针对蒙皮的创意角色模型的三维制造技术

摘 要 \*中文摘要内容置于此处(中英文摘要内容一致)，字体为小5号宋体\*摘要

关键词 三维制造；创意造型；多姿态平衡；结构变异；

中图法分类号 \*\*\*\*　　　DOI号 \*投稿时不提供DOI号\* 分类号

Fabricating and Rigging Creative Characters

**Abstract** Creative modeling provides a new means for novice users to create 3D content in an open-end manner. However, most current creative modeling methods are mainly designed to model static objects only. In contrast to these methods, we present a new method for modeling dynamic creative models which are rigged and fabricatable. Starting from a small set of skinned watertight objects, our system iteratively synthesizes new creative characters for users to explore. A user can choose those of interest for animation or fabrication directly. By unifying modeling, animation and fabrication together, our method provides an efficient and convenient means for users to facilitate the creative design process.

**Key words** Fabrication；Creative Modeling；Multi-pose balancing；Structure alteration tools；

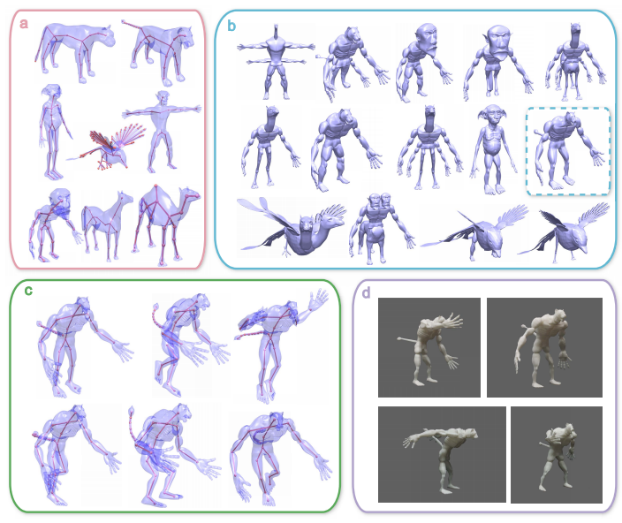
# **引言**

高效地且富于创造性地设计与造型三维模型在图形学研究领域一直是个非常困难的问题。基于草图的三维造型方法~\cite{Igarashi1999SG,AndrewNealen2007}易学易用，但仅限于造型光滑且缺少几何细节的模型。当前的研究趋势越来越看重造型过程中的创造性支持，因此几何造型不再被仅仅视为一项技术，而更多地被视为一种创造过程。研究人员提出各种各样的技术以为三维造型提供创造力支持~\cite{Talton2009,Chaudhuri2010,Chaudhuri2011,Xu2012SG,Kalogerakis2012SG,Guo2014GM}。

在很多应用中，造型仅是第一步，后面要为造型结果蒙皮并编辑动画。传统上，造型与蒙皮两个步骤分开。

这种做法使得迭代更新变得异常困难，因为动画师不得不频繁地在造型与蒙皮工具间来回切换。这种做法浪费时间且影响效率。Borosan等人~\cite{Borosan2012}提出一个统一的框架无缝地整合了造型与蒙皮两个步骤。Jin等人~\cite{Jin2015}又将运动重定向融合至如上框架，提供了一个非线性的建模/动画工具。将创造力支持的造型与动画设计结合至一个统一的框架非常重要。这样，动画师就可以增量式的方式编辑动画，并立即观察到动画效果。另外一方面，通过使用现有的已蒙皮的模型，也节省了不必要的重复性工作。这样的方法对计算机动画，计算游戏设计与其它数字娱乐形式有非常重要的意义。然而，据我们所知，在这方面几乎没有任何研究工作。

除此之外，三维打印技术的普及使得用户可以自己制造个性化的三维模型。在创造力支持的造型系统中融合针对制造的分析，不仅仅可以通过部件组合得到高质量的模型，更可以探索模型在不同姿势下的物理特性，这对用户的创造性造型过程大有益处。然而，要三维打印一个模型需要考虑很多问题，例如，拓扑，平衡性，结构稳定性等。我们的问题更加困难和复杂。首先，为了实现逼真的动画效果，骨架往往有很多关节。但对三维制造来讲，太多的关节不仅没有必要，甚至是一种负担。例如，在图1（c）内，就三维打印来讲，尾巴部分完全不需要这么多关节。另外一种重要问题，打印出来的模型需要在一系列姿势下保持平衡。虽然三维打印方面已有很多研究工作，如，打印带关节的角色模型~\cite{Cali2012SG,Moritz2012}，使模型保持平衡~\cite{Prevost2013TOG,Zhao2016GMP}。然而，还没有人探索过使打印出来的模型在一系列姿势下保持平衡的问题。



创新性地造型的一个例子。 （a）输入模型。 （b）模型进化阶段提示给用户的模型。虚线矩形框圈住的模型是用户选择的感兴趣的模型。（c）动画编辑阶段得到的几个动作。 （d）三维打印出的模型的三个不同姿势。

在这篇文章中，我们提出针对蒙皮的创意角色模型的三维制造技术。该技术将创造力支持的造型，三维打印分析与骨架绑定融合在一个框架中，极大地方便了用户的创造性造型过程。如图1所示，输入一组蒙皮的模型，我们的系统通过结构变异工具~\cite{Guo2014GM}``进化''出新一代形状各异的模型。然后，用户从中选择出感兴趣的模型，用于进化下一代模型。进化过程如此迭代，直至代数达到阈值，或者用户满意。接着，用户可以从得到的模型中选择一个，蒙皮并三维打印。通过造型，蒙皮与三维打印的无缝融合，我们的系统提供给用户蒙皮的且可直接三维打印的模型，极大地帮助了用户的创意造型。

我们的工作有两个创新：

**蒙皮部件融合** 我们提出一种新的技术，可以融合部件表面的同时融合骨架，并以局部方法快速更新融合部件的皮肤权重。

**面向三维打印的蒙皮角色模型的分析** 我们提出一种针对三维打印的骨架优化算法，可以计算出关节的最优数量及位置。而且，我们提出一种确保三维物体在不同姿势下保持平衡的方法。

1. 相关工作

**骨架绑定技术** 在计算机动画中，角色骨架往往以分层的形式组织骨骼与关节。骨架绑定~\cite{kavan10SAM}之后的模型才可以编辑动画。各种各样的技术被提出来用于骨架绑定~\cite{Jacobson:2014:SRS:2614028.2615427}。最近，Borosan et al.~\cite{BorJinDeCGinNea12}提出一个统一的框架，该框架实现了基于草图的建模与骨架绑定融合。这项工作被Jin et al.~\cite{Jin2015}进一步发展，用于支持动画重定位。与现有的方法不同，我们将创造力支持的建模，骨架绑定和三维打印无缝地融合到一起统一的框架中，极大地简化了用户的整个创造性地设计过程。

{基于部件组合的建模技术} 由于其高效且易用，基于部件组合的建模技术受到非常多的重视~\cite{FunKazShiMinKieTalRusDob04,YuZhoXuShiBaoGuoShu04}。随着图形学领域逐步认识到在三维建模过程中提供创造力支持的重要性，研究人员提出各种各样的支持用户自由探索建模空间的技术~\cite{TalGibYanHanKol09,ChaKol10,ChaKalGuiKol11,XuZhaCheCoh12,KalChaKolKol12}。与现有的方法不同，我们将动画与三维打印融合到创造力支持的建模技术中。从而使用户可以从绑定的模型中得到更多的灵感，也可以简便地确认三维打印的可行性。

{针对三维打印的模型设计技术} 随着三维打印机的普及，三维打印技术及其应用越来越具有吸引力。然而，在三维模型可以做三维打印之前需要做很多预处理工作。三维模型需要符合一系列的拓扑标准~\cite{Kazhdan:2005:RSM:1281920.1281931}，可以保持平衡~\cite{PreWhiLefSor13}，结构足够坚固~\cite{ZhoPanZor13}。所有这些要求都需要大量的针对三维制造的几何处理研究工作。在本文内，我们解决了铰链的角色在不现姿势下的平衡问题。该问题尚未被以前的工作解决过~\cite{CalCalAmaKleSteKauWey12,BacBicJamPfi12,PreWhiLefSor13}。

1. 方法概述

我们的方法总共分三个阶段（图~\ref{FigPipeline}）：预处理阶段，模型进化阶段和应用阶段。在预处理阶段，我们对每一个输入模型归一化，对齐，蒙皮，按语义分割标记，检测对称部件。在模型进化阶段，用户从数据库内选择若干来自不同类的模型，做为第一代模型。在进化过程中，当前代模型通过模型结构变异技术进化出新一代模型。进化过程不断进行，直至用户满意或者达到最大代数。进化过程停止后，用户选择感兴趣的模型，进入应用阶段。在应用阶段，被用户选择的模型通过我们的蒙皮部件融合方法转换成流形，皮肤权重也做了更新；然后，经过面向三维打印的蒙皮角色模型的分析处理。最终，我们得到一个可以直接编辑动画与三维打印的模型。

%--------------------------

\begin{figure}[t]\centering

\includegraphics[width=\linewidth]{./Mat/FabRig/Pipeline.pdf}

\caption[方法流程图]{方法流程图。}\label{FigPipeline}

\end{figure}

1. \section{模型融合}

部件融合是核心步骤。除了要融合模型表面，还要融合骨架并更新蒙皮权重。

4.1 \subsection{表面融合}

%--------------------------

\begin{figure}[t]\centering

\includegraphics[width=\linewidth]{./Mat/FabRig/SurfaceMerge.pdf}

\caption[表面融合示意图]{表面融合示意图。（a）两个要融合的部件。（b）间隙三角化。（c）边界光顺。}\label{FigSurfaceMerge}

\end{figure}

给两个部件，我们的目标是将两个无缝地融合到一起，得到一个流形。我们假设欲融合的两部件间有一个间隙（见图~\ref{FigSurfaceMerge}（a））。这条间隙可以通过将其中一个部件向旁边偏移一点距离得到。这个间隙假设为造型过程提供了更多灵活性，使我们可以融合边界拓扑不同的两部件。我们首先将两部件间的间隙用三角形带填充（见图~\ref{FigSurfaceMerge}（b）），接着在融合处做局部拉布拉斯光顺，从而得到光滑的过渡曲线且提升融合曲面的网络质量（见图~\ref{FigSurfaceMerge}（c））。我们把间隙缝合问题形式化成最优边界过渡曲面三角形化（BBT）问题~\cite{Wang2005CISE}。给两个分段线性曲线$C\_p$（$m$个顶点）和$C\_q$（$n$个顶点），一个BBT就是一个通过迭代施加P-succeed与Q-succeed操作得到的三角形序列$M = \left\{T\_1, T\_2, \ldots, T\_N \right\}$。P-succeed操作施加在边$p\_i q\_j$上，得到三角形$p\_i p\_{i+1} q\_j$（图~\ref{FigBBT}（a））。Q-succeed操作施加在边$p\_i q\_j$上，得到三角形$p\_i q\_j q\_{j+1}$（图~\ref{FigBBT}（b））。我们的目标是要在所有BBT内找到使我们的目标函数取得最优值的一个BBT。根据~\cite{Wang2005CISE}，该组合搜索问题可以转化为最短路径问题（图~\ref{FigBBT}（c）），进而用Dijkstra算法求解。接下来我们需要为图内边定义合适的权重。模型表面融合的关键考虑因素是确保融合边界尽可能地光滑，同时使过渡曲面上的三角形尽可能地规则。因此，我们定义三角形$T$的边权重为如下值：

\[{E\_m} = \omega {E\_s} + {E\_r},\]

其中，$E\_s$用于衡量三角形$T$的法向与其相邻三角形法向均值的一致性，$E\_r$衡量三角形$T$的质量。在本章的所有实验中，$\omega=0.2$。$E\_s$定义为：

\[E\_{s}=3-\mathbf{n}\_{t}\cdot \mathbf{n}\_{1}- \mathbf{n}\_{t}\cdot \mathbf{n}\_{2}- \mathbf{n}\_{t}\cdot \mathbf{n}\_{3},\]

其中，${\bf n}\_t$是三角形$T$的法向，${\bf n}\_1$，${\bf n}\_2$和${\bf n}\_3$为与$T$相邻的三个三角形的法向。$E\_r$定义如下：

\[E\_{r}=\mid 2\sqrt{3}\times r/l-1.0 \mid,\]

其中，$r$是外接圆的半径，$l$是$T$的最长边。

%--------------------------

\begin{figure}\centering

\includegraphics[width=0.91\linewidth]{./Mat/FabRig/BBT.pdf}

\caption[BBT示意图]{BBT示意图。（a）P-succeed操作。（b）Q-succeed操作。（c）最短路径问题示意。（d）$E\_s$能量项示意。（e）$E\_r$能量项示意。}\label{FigBBT}

\end{figure}

4.2 骨架融合

欲做融合的两部件分别称为主部件与融合部件。为了融合两部件的骨架，我们首先计算主部件骨架上与融合部件骨架未端关节点的最近点。如果最近点恰好是主部件的关节点，我们直接将该关节点与融合部件骨架未端点连接（图~\ref{FigSkeletonMerge}（a））。否则，我们首先在该最近点处插入一个关节，再把插入的关节与融合部件骨架未端点连接（图~\ref{FigSkeletonMerge}（b））。

4.3蒙皮权重

我们已将两个部件的表面与骨架融合到一起得到一个新的模型。接下来，需要为该新模型更新蒙皮权重。我们采用类似~\cite{Borosan2012}的方法对新模型的蒙皮权重做局部更新。首先，我们检测出需要更新权重的顶点与骨骼。然后，采用局部蒙皮权重计算方法为这些顶点计算权重。如果模型表面上某顶点的最近可视骨骼在该顶点的蒙皮权重没有达到权重平均值（由所有骨骼对该顶点的正值权重求得），我们称该顶点为脏顶点。脏顶点的最近可视骨骼为脏骨骼。我们采用洪泛算法检测需要更新权重的顶点与骨骼，从融合边界的顶点开始，一直到脏顶点为止，遍历到的顶点都是需要更新权重的顶点，脏骨髓为需要更新权重的骨骼。为了使模型上的权重光滑分布，最外侧脏顶点的二环领域顶点（扩展顶点）也包括在需要更新权重的顶点内（如图~\ref{FigSkinningWeight}）。

%--------------------------

\begin{figure}\centering

\includegraphics[width=0.8\linewidth]{./Mat/FabRig/SkeletonMerge.pdf}

\caption[骨架融合示意图]{骨架融合示意图。融合部件为浅棕色。插入的关节及骨胳为绿色。融合部件骨架的未端关节直接与主部件骨架上的最近关节点相连（a）。

先向主部件骨架插入关节点，再将融合部件骨架与插入的关节点相连（b）。}\label{FigSkeletonMerge}

\end{figure}

%--------------------------

\begin{figure}\centering

\includegraphics[width=0.8\linewidth]{./Mat/FabRig/SkinningWeight.pdf}

\caption[脏顶点和脏骨骼示意图]{脏顶点和脏骨骼示意图。脏顶点和脏骨骼用红色标记。扩展顶点用绿色标记。融合边界用紫色标记。}\label{FigSkinningWeight}

\end{figure}

1. \section{面向三维打印的模型分析}

在本章中，我们介绍面向三维打印的模型分析方法。该方法可得到用于三维打印的关节模型。

5.1 \subsection{针对三维打印的骨架优化算法}

正如前面所提到的，骨骼动画与关节模型三维打印对模型骨架的要求完全不同。我们需要在三维打印之前优化动画骨架的关节数目与位置。我们采用如下原则决定三维打印时是否需要保留动画骨架的某关节：

\begin{enumerate}

\item 处于两语义部件连接处的关键关节（Critical Joint）必须保留，因为这样的关节处于部件边界的中心点处。

\item 如果某关节在大多数动画序列中几乎没有变化，该关节被删掉。

\item 保留下来的两关节间距必须大于某阈值。

\item 用户指定的关节必须保留或删掉。

\end{enumerate}

给某模型的一组动画序列，我们为该模型的关节$J\_i$定义变量$\rho\_i$，来评估该关节是否需要保留：

\[ \rho\_{i}=\sum\_{k}\parallel \mathbf{M}\_{k}^{i}-\mathbf{I}\parallel^{2}\_{F}, \]

其中，${\bf M}\_k^i$是关节$J\_i$的第$k$个变换矩阵，${\bf I}$是单位矩阵，$\left\| \cdot \right\|\_F^2$是Frobenius范数。

$\rho\_i$衡量了关节$J\_i$在整个动画序列中的变化。

为了计算关节$J\_i$在三维打印时的最优位置，我们取得那些与该关节的蒙皮权重大于阈值$\omega$（在我们的实验中$\omega=0.8$）的所有顶点$V\_m$。

然后，我们用球面拟合带权重的顶点集合$V\_m$（权重为顶点的蒙皮权重）。拟合球的中心是动画关节$J\_i$对应的打印关节的最优中心点。打印关节的半径是拟合球的半径。

最后，我们按如下标准判断非关键关节$J\_i$在三维打印时是否需要除掉（如图\ref{FigJointFilter}）：

\begin{itemize}

\item 为了防止两打印关节重合，如果关节$J\_i$与它的邻居$J\_j$间距$d\_{ij}$小于阈值$1.2 \left(r\_i + r\_j \right)$（$r\_i$和$r\_j$分别为两关节$J\_i$与$J\_j$对应的三维打印关节半径），那么将$J\_j$除掉（$J\_j$对应的$\rho\_j$比$J\_i$的小）；

\item 如果关节的$\rho$低于某阈值，将该关节删除，因为这样的关节可以视为静态关节；

\item 为了确保打印模型结构足够坚固，如果关节的横截面面积小于阈值$A\_{min}=0.179$，该关节被除掉；

\item 模型上的关节必须对称排列，除掉无对称关节的关节。

\end{itemize}

%--------------------------

\begin{figure}[t]\centering

\includegraphics[width=\linewidth]{./Mat/FabRig/JointFilter.pdf}

\caption[面向三维打印的关节优化过程示意图]{面向三维打印的关节优化过程示意图。给一个蒙皮模型（a），我们的骨架优化算法优化关节（b），得到一组适合三维打印的关节（c）。

三维打印得到的模型如（d）所示。}\label{FigJointFilter}

\end{figure}

5.2 \subsection{多姿势模型平衡算法}

我们扩展了~\cite{Prevost2013TOG}提出的方法，使其可以处理多姿态模型的平衡问题。我们的方法与~\cite{Prevost2013TOG}有两个区别：

（1）我们在所有姿态对应的模型内部做一致性挖空，这可以确保打印出来的模型在所有姿态下保持平衡；

（2）我们为各姿态下的模型建立一致的六面体网格来表示模型的体积，而不是简单地使用体素网格。

给模型$M$，令$S\_0, S\_1, \ldots, S\_k$依次为模型$M$在$k$个不同姿态下的表面，我们的目标是通过在所有姿态的模型内一致性挖空，最小化如下目标函数：

$$ \arg\min \sum\_{k}\parallel(\mathbf{c}(S\_{k}, I\_{k})-\mathbf{c}\_{k}^{\*})^{\bot\mathbf{g}} \parallel^{2}, $$

其中，$I\_k$是$S\_k$的内表面，${\bf c} \left(S,I \right)$计算外表面$S$与内表面$I$围成的体积的质心，${\bf c}\_k^\star$是第$k$个姿态对应的模型的目标质心，

$\bf g$是引力方向，$^{\bot\mathbf{g}}$表示沿着引力方向向支撑平面做垂直投影。

我们首先将模型在所有姿态下的表面投影至多重立方体域（polycube domain），然后为这些多重立方体域建立一致的六面体网格~\cite{Han2010}。

接着，我们用启发式的方法去逼近最优挖空结果（如图~\ref{FigMultiPose}）。对模型$M$的第$k$个姿态，令当前的质心是${\bf c}\_k^0$，我们可以计算出一个垂直于$\left({\bf c}\_k^0 - {\bf c}\_k^\star \right)^{\bot {\bf g}}$过$\left({\bf c}\_k^\star \right)^{\bot {\bf g}}$的切割平面。

挖掉与${\bf c}\_k^0$在同一半空间内的体素（被挖掉的体素集合记为$V\_k$）将使${\bf c}\_k^0$向${\bf c}\_k^\star$移动，从而降低目标函数值。

我们取得所有体素$\bigcap\limits\_k {{V\_k}}$，并按分数降序排列。分数计算方法如下：

$$ d{i}=\sum\_{k}(\mathbf{v}\_{i}-\mathbf{c}\_{k}^{\*})\cdot(\mathbf{c}\_{k}^{0}-\mathbf{c}\_{k}^{\*})^{\bot\mathbf{g}}, $$

其中，${\bf v}\_i$是体素$i$的中心。

%--------------------------

\begin{figure}[t]\centering

\includegraphics[width=\linewidth]{./Mat/FabRig/Carve.pdf}

\caption[多姿势模型平衡算法流程示意图]{多姿势模型平衡算法流程示意图。我们用二维形状表示三维模型（如（a）内紫色形状）。给模型的两个不同姿势对应的模型$M\_0$与$M\_1$（a），我们首先为两模型的躯干部件建立一致的六面体网格（用二维网格表示）（b）。 $M\_0$与$M\_1$的支撑点分别为$\left( {\bf c}\_0^\* \right)^{\bot g}$与$\left( {\bf c}\_1^\* \right)^{\bot g}$（c）。$M\_0$与$M\_1$当前的质心分别为${\bf c}\_0^0$与${\bf c}\_1^0$（c）。

空间半平面用空间半直线表示（c）。每个模型内可以挖掉的体素用红色标识。最后，我们取得可以挖掉的体素的交集（如（d）内红色标记网格），并为交集内的体素排序。}\label{FigMultiPose}

\end{figure}

如果在模型所有的姿态下无解，我们提醒用户从现有姿态内采样出一组姿态并重新优化该目标函数。

5.3 \subsection{机械关节设计算法}

\paragraph{关节类型计算} 我们使用两种机械关节（见图~\ref{FigJointType}）：球窝式关节与铰链式关节。

用户需要操作``别针''为关节指定最大旋转幅度（见图~\ref{FigPins}）。一旦用户为关节确定了旋转约束，算法会自动计算关节类型。

%--------------------------

\begin{figure}\centering

\includegraphics[width=0.93\linewidth]{./Mat/FabRig/JointType.pdf}

\caption[两类关节示意图]{两类关节示意图。（a）球窝式关节。（b）铰链式关节。}\label{FigJointType}

\end{figure}

%--------------------------

\begin{figure}\centering

\includegraphics[width=\linewidth]{./Mat/FabRig/Pins.pdf}

\caption[``别针''示意图]{``别针''示意图。红色别针表示骨骼的方向。红色的球是机械关节的位置（旋转中心）。绿色别针指示出该机械关节的最大旋转幅度。用户操作绿色别针设置关节的旋转约束。}\label{FigPins}

\end{figure}

\paragraph{可摆姿势的关节打印} 与打印静止模型不同，打印关节模型的最关键挑战是要确保打印出的模型可以保持一定的姿势。

这就要求打印出的关节能承受一定的重力。为了确保关节具有承重摩擦力，类似~\cite{Moritz2012}，我们为关节面（Positive Joint Part）增加半径为$r\_b=0.06$的球状突起，

为关节囊（Negative Joint Part）增加半径为$r\_b + 0.05$的球状凹陷（如图~\ref{FigJointType}）。

1. \section{模型建议}

类似~\cite{GuoLinXuJin14}，在进化阶段，我们提示一代代的新模型供用户选择。在每一次迭代过程中，我们通过结构变异规则将当前模型进化成新一代模型。

结构变异规则受启发于三维建模师常用的建模方法，包括：（1）替换工具（如图~\ref{FigStructTools}（a）），在不同模型间交换部件；

（b）增加工具（如图\ref{FigStructTools}（b）），将一个部件复制一次或两次；

（c）组合工具（如图\ref{FigStructTools}（c）），将类人模型的上半部分与四肢动物或鸟类模型的下半部分结合，得到半人马型模型；

（d）插入工具（如图\ref{FigStructTools}（d）），对当前模型插入一个新类型的部件。、

%--------------------------

\begin{figure}\centering

\includegraphics[width=\linewidth]{./Material/FabRig/StructureTools.pdf}

\caption{结构变异工具示意图。在每个子图内，原始模型在左边，变异结果模型及其骨架在右边。（a）交换工具。（b）增加工具。（c）组合工具。（d）插入工具。}\label{FigStructTools}

\end{figure}

1. \section{实验结果}

我们在标准台式机（Intel Core i7 (3.77GHz), 8 GB RAM and NVIDIA Geforce GTX 660 GPU）上实现了系统原型并做实验。

我们的系统需要一个由绑定好的三维模型构成的数据库。当前，我们采用~\cite{BarPop07}自动为模型绑定骨架，采用~\cite{Kalogerakis2010SG}方法自动化地分割并标记模型。

每个模型的预处理步骤平均需要$25$分钟。

我们的方法可以确保模型在不同姿势下保持平衡（见图\ref{FigWorkFlow0}（d），图\ref{FigWorkFlow1}（d）及图~\ref{FigWorkFlow2}（d））。

我们邀请了$8$位学生来评估我们的方法。首先，我们花$30$分钟时间为所有参与者介绍我们的系统；然后，每位参与者花$30$分钟时间试用我们的系统以熟悉操作流程；

最后，测试者不受限制地使用我们的系统造型。其中一个参与者做出的结果如图\ref{FigWorkFlow1}。

我们邀请了$3$位具有$4$年以上造型与动画设计经验的艺术家来参与用户测试。一个测试者做出的结果如图\ref{FigWorkFlow2}。几位测试者对我们系统持非常正面的态度。

他们认为我们将造型，动画与三维打印集成到一个统一的框架中，极大的简化了用户操作，并为整个创意造型过程提供了更多的创造力支持。

%--------------------------

\begin{figure}[t]\centering

\includegraphics[width=\linewidth]{./Mat/FabRig/workflow1.pdf}

\caption[创新性地造型的一个例子]{创新性地造型的一个例子。（a）输入模型。（b）模型进化阶段提示给用户的部分模型。用虚线矩形框圈住的模型是用户选择的感兴趣的模型。

（c）动画编辑阶段得到的几个动作。（d）三维打印出的模型摆出的三个姿势。}\label{FigWorkFlow1}

\end{figure}

%--------------------------

\begin{figure}[t]\centering

\includegraphics[width=\linewidth]{./Mat/FabRig/workflow2.pdf}

\caption[创新性地造型的一个例子]{创新性地造型的一个例子。（a）输入模型。（b）模型进化阶段提示给用户的部分模型。用虚线矩形框圈住的模型是用户选择的感兴趣的模型。

（c）动画编辑阶段得到的几个动作。（d）三维打印出的模型摆出的三个姿势。}\label{FigWorkFlow2}

\end{figure}

1. \section{本章小结}

在这篇文章中，我们提出一个针对蒙皮的创意角色模型的三维制造技术。

我们的系统将创造力支持的造型，蒙皮动画与三维打印分析无缝融合到统一的框架中，辅助用户的整个创意造型过程，得到可直接编辑动画的且可直接三维打印的模型。

输入若干绑定的模型，我们的方法通过结构变异工具进化出新一代模型。进化过程迭代进行，直至用户满意或达到最大代数。

接着，用户挑选出感兴趣的模型。我们的系统实时地自动地融合模型表面及其骨架，更新蒙皮权重，得到可编辑动画的模型。

然后，我们采用面向三维打印的模型分析算法处理该模型，得到可直接三维打印的模型。

我们的系统提供了从造型到动画，再到三维打印的全部流程，避免了在几个工具间来回切换，简化用户操作，提高工作效率。

致 谢 \*致谢内容.\* 致谢

参 考 文 献

[1] 网上的文献[[1]](#footnote-1)(举例：The Cooperative Association for Internet Data Analysis(CAIDA),http://www.caida.org/data 2010,7,18) **\*请采用脚注放于正文出现处\***

[2] 中文的参考文献需给出中英文对照。形式如[3]。

[3] Zhou Yong-Bin, Feng Deng-Guo. Design and analysis of cryptographic protocols for RFID. Chinese Journal of Computers, 2006, 29(4): 581-589 (in Chinese)  
(周永彬, 冯登国. RFID安全协议的设计与分析. 计算机学报, 2006, 29(4): 581-589)

[4] 期刊、会议、书籍名称不能用缩写。

[编号] 作者(外国人姓在前，名在后可缩写, 后同). 题目(英文题目第一字母大写，其它均小写)：副标题(如果有). 刊名(全称), 年, 卷(期): 页码 **\*期刊论文格式\***

[编号] 作者. 文章题目(英文题目第1字母大写，其它均小写)：副标题(如果有)//Proceedings of the … (会议名称). 会议召开城市, 会议召开城市所在国家, 年: 页码 **\*会议论文集论文格式\***

[编号] 作者. 文章题目(英文题目第一字母大写, 其它均小写): 副标题(如果有)//编者. 文集标题. 出版地: 出版社, 出版年: 页码 **\*文集格式\***

[编号] 作者. 书名: 副标题(如果有). 版次(初版不写). 出版社地点: 出版社, 出版年 **\*书籍格式\***

[编号] 作者. 文章题目[博士学位论文/硕士学位论文]. 单位名称,单位地点, 年 **\*学位论文格式\***

[编号] 作者. 文章题目(英文题目第一字母大写，其它均小写). 单位地点: 单位, 技术报告: 报告编号, 年 **\*技术报告\***

[编号] 专利拥有人. 专利名称，专利授权国家，专利授权日期

**\*技术专利\***

附录X.

\***附录内容**置于此处，字体为小5号宋体。附录内容包括：**详细的定理证明、公式推导、原始数据**等\*

**Background**

\*论文背景介绍为**英文**，字体为小5号Times New Roman体\*

论文后面为400单词左右的英文背景介绍。介绍的内容包括：

本文研究的问题属于哪一个领域的什么问题。该类问题目前国际上解决到什么程度。

本文将问题解决到什么程度。

本研究群体以往在这个方向上的研究成果。

1. [↑](#footnote-ref-1)