

نمایش یک سطح رقمی شده به وسیلهٔ وجوه مثلثی شکل

بهروز قلی زاده*

دانشکده مهندسی کامپیوتر، دانشگاه صنعتی شریف

(دریافت مقاله: ۱۳۷۴/۵/۲۳ - دریافت نسخه نهایی: ۱۳۷۵/۱/۲۸)

چکیده - در این مقاله، روشی برای مثلث بندی یک جسم رقمی شده، که نقاط رقمی شده آن در یک شبکه منظم توپولوژیکی توزیع شده‌اند، ارائه می‌شود. اساس روش مزبور بر تقسیم تکراری و تطابقی وجوه مثلثی شکل یک چند وجهی اولیه قرار دارد. با فرض یک رابطه دوسویی بین سطح رقمی شده و سطح تقریبی آن، افزایی بر روی مبنای داده‌ها صورت می‌پذیرد. روش ارائه شده دارای امکان اندازه گیری کیفیت موضعی تقریب است و می‌تواند مانع پیدایش مثلثهای با گوشه های تند شود. پایین بودن پیچیدگی محاسباتی آن، امکان تقریب یک سطح را با مجموعه ای بسیار وسیع از داده‌ها می‌دهد.

Representation of a Digitized Surface by Triangular Faces

B.Gholizadeh

Department of Computer Engineering, Sharif University of Technology

ABSTRACT- This paper proposes a triangulation method for a digitized surface whose points are located on a regular lattice. The method relies on an iterative and adaptive splitting of triangular faces of an initial polyhedral surface. Assuming a bijection between the digitized surface and its approximation, a partition of the data base is performed. The method allows the measurement of the local quality of the approximation and avoids the generation of triangles with sharp corners. Its low computational complexity permits the approximation of very large sets of points.

سیستمهای بسیاری بر اساس نظریه های گوناگون برای ضبط داده‌های توصیف کننده اجسام سه بعدی ایجاد شده‌اند. به علاوه کارهای تحقیقاتی بسیار وسیعی به نمایش اجسام سه بعدی، از روی چنین داده‌هایی اختصاص داده شده است. سیستم ضبط داده‌های مورد اشاره در این مقاله، یک سیستم ضبط ویدئولیزر سه بعدی است که قادر است در عرض چند ثانیه حدود چند صد هزار نقاط داده توزیع شده بر روی یک شبکه منظم از مدارها و نصف النهارهای

۱ - مقدمه

بسیار مهم در زمینه های متفاوت تحقیقاتی و کاربردی مانند شناسایی الگوها، هوش مصنوعی، رباتیک، طراحی به کمک کامپیوتر و تصاویر سنتز و غیره، ضبط ۱ و نمایش ۲ شکل‌های سه بعدی است [۱].

* استادیار

واقع بر روی سطح یک جسم صلب سه بعدی را رقمی کند [۲].
برای نمایش شکل‌های سه بعدی دو نوع مدل اساسی وجود دارد:
نمایش سطحی و نمایش حجمی.

نمایش سطحی یک جسم، یا به وسیله شبکه ای از چند ضلعیها (سطوح مسطح) و یا به وسیله شبکه ای از وصله ها^۳ (سطوح خمیده) امکانپذیر است. نمایش حجمی یک جسم نیز می تواند به وسیله شبکه ای از چند وجهیها، هشت درختیها^۴، استوانه های عمومی^۵ و یا روش ساختار هندسی جسم صلب^۶ صورت پذیرد [۳]. انتخاب یک مدل نمایش به عوامل متعددی بستگی دارد. ذخیره سازی، پیچیدگی نمایشها، دستکاری روی نمایشها، کازبرد و هدف نهایی از جمله عواملی هستند که می توانند در این انتخاب مؤثر باشند. نمایش یک جسم به وسیله شبکه ای از مثلثها (مثلث بندی [۴-۵])، به دلیل سادگی اش، بیشترین کاربرد را در میان مدل‌های نام برده شده، دارد. با وجود این، مسئله مثلث بندی یک جسم سه بعدی فقط در حالت خاصی که یک ساختار از پیش تعریف شده بر روی نقاط داده اعمال شود، نتایج مطلوبی به دست می دهد. به عنوان مثال در توموگرافی^۷ رقمی در علم پزشکی، نقاط رقمی شده جسم بر روی برشهای مسطح موازی قرار دارند. برای چنین حالت خاصی، روشهای مثلث بندی به روش برشهای موازی با نتایج خوبی ارائه شده اند [۶ و ۷]. برای حالت خاصی نیز که نقاط داده ها از روی سطح یک جسم محدب اندازه گیری شده باشند، روشهای بهینه ای ارائه شده اند که بر اساس نظریه مثلث بندی دلونی^۸ پایه گذاری شده اند [۵ و ۸-۱۰]. راه حل مسئله در حالت عمومی بسیار مشکل است.

تنها یک روش عمومی که در واقع تعمیم تقریب یک منحنی ساده به وسیله یک چند ضلعی به فضای سه بعدی است در مرجع [۱۱] ارائه شده است. ایراد عمده این روش، گذشته از بالا بودن پیچیدگی محاسباتی آن ($O(n^2 \log n)$ که در آن n تعداد نقاط داده هاست)، امکان ایجاد یک سری مثلثهای با گوشه های تند است. این روش مثلث بندی، اضلاع قدیمی را محفوظ نگاه می دارد، هر چند که نمایش تقریب خوبی نباشند.

در این مقاله، روش جدیدی برای مثلث بندی یک سطح رقمی شده ارائه می دهیم که دارای پیچیدگی محاسباتی کمتر و دارای

مثلثهای خوش تعریف است. به عبارت دیگر، الگوریتم اگر در مرحله ای تشخیص دهد که ضلعی تقریب خوبی به دست نمی دهد، آن ضلع را می شکند و با اضلاع جدیدی با تقریب بهتر جایگزین می کند.

۲- سیستم رقمی کننده جسم سه بعدی

از آنجایی که روش مثلث بندی ما بر روی نقاط داده های رقمی شده ای اعمال خواهد شد که حاصل از سیستم رقمی کننده ای است که قبلاً در مورد آن بحث شد، لازم است که به طور مختصر به عملکرد سیستم فوق پردازیم.

جسمی که باید رقمی شود بر روی یک سکو با موتور چرخان گام به گام قرار داده و به وسیله یک سطح نوری لیزری روشن می شود (شکل ۱). محل تلاقی این سطح نوری با جسم یک منحنی نورانی (مدار) به دست می دهد که به وسیله یک (ریسچند) دوربین ویدیویی مشاهده می شود. از سیگنال ویدیویی حاصل از این دوربین، می توان موقعیت منحنی نورانی را بر روی یک صفحه مانیتور استخراج کرد و در نتیجه اطلاعات به اندازه کافی دقیق برای محاسبه مواضع حدود ۶۰۰۰ نقطه روی سطح جسم واقع در سیستم مختصات - جسم را به دست آورد. سپس با یک گام چرخش، جسم در موقعیت جدید قرار می گیرد و اندازه گیری جدیدی برای مدار جدیدی صورت می پذیرد. بدین ترتیب می توان مختصات حدود ۲۰۰۰۰۰ نقطه مربوط به ۳۶۰ مدار را اندازه گیری کرد.

این روش رقمی سازی، استخراج مختصات $(\theta, Z, R(\theta, z))$ روی سطح جسم را در یک دستگاه مختصات استوانه ای امکانپذیر می سازد. حال فرض کنید که F_i و Z_i به ترتیب گامهای نمونه گیری در زاویه چرخش و روی محور Z ها باشند و M تعداد چرخشهای سیستم رقمی کننده باشد. فرض شده است که تعداد نقاط رقمی شده روی هر مدار n_i $1 \leq i \leq M$ یکسان و برابر N است. بدین ترتیب $M \times N$ نقطه رقمی شده روی سطح جسم را می توان به وسیله یک تصویر $M \times N$ نمایش داد که در آن عنصر (i, j) حاوی شعاع $(Z_i, R(i, F_j))$ و در نتیجه نمایش دهنده نقطه به مختصات $(R(i, F_j), Z_i, R(i, F_j))$ روی سطح جسم است. سطرها و ستونهای این تصویر به ترتیب نمایش دهنده کانتورهای

رابطه دو سوویی بین رویه جسم و سطح چند وجهی در روش فوق ماعلاقه مند به سطوح چند وجهی هستیم که در حوزه تعریف $D(S)$ دارای همان خواصی باشند که رویه جسم دارد. یعنی تابعی مثل p موجود است به گونه ای که به ازای هر $(a, b) \in D(S)$ تنها یک نقطه از سطح چند وجهی وجود دارد که مختصات آن $(a, b, p(a, b))$ است. چنین سطح چند وجهی باید دارای شرایط خاصی باشد و متعلق به کلاس ویژه ای است که ما به اختصار آن را با PS نمایش می دهیم. در الگوریتم ما یک PS اولیه طبق شرایط فوق باید داده شده باشد. بنابراین تعریف دو سوویی بین رویه رقمی شده و سطح چند وجهی متعلق به PS کار ساده ای است. برای هر (a, b) از $D(S)$ دو سوویی فوق نقاط $(a, b, s(a, b))$ و $(a, b, p(a, b))$ را به هم ربط می دهد. این دو سوویی کلید الگوریتم است زیرا ما را قادر می سازد که:

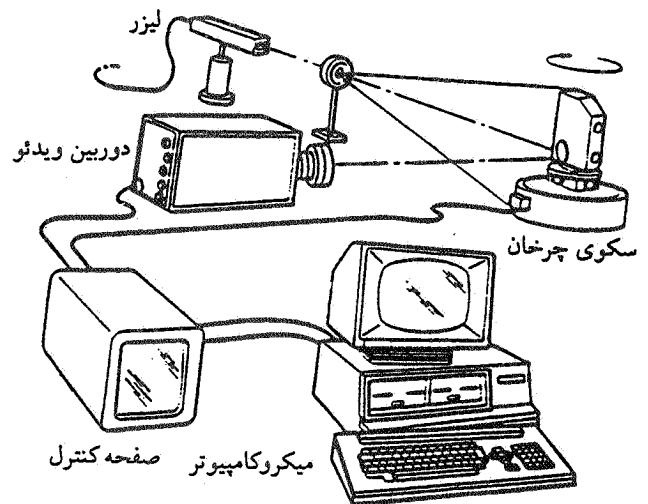
- ۱- یک معیار کیفی تقریب را برای خطای موضعی، که فاصله بین یک نقطه رقمی (a, b, c) و متناظر آن $(a, b, p(a, b))$ روی PS است، تعریف کنیم.
- ۲- به راحتی بتوانیم برای هر PS مجموعه ای از مؤلفه های همبند گراف G وابسته به اضلاع PS و یا سطوح PS را تعریف کنیم.

این دو سوویی وسیله قدرتمندی فراهم می آورد تا برای یک PS داده شده، افزای بر روی مجموعه نقاط داده های رقمی شده تعریف کرد. بدین ترتیب از جستجوی ترکیباتی پرهزینه جلوگیری به عمل آورد و به طور قابل ملاحظه ای پیچیدگی محاسباتی لازم برای تعیین افزا را کاهش داد. این امکان نیز فراهم می شود تا برای یک مبنای داده وسیع (حدود چند صد هزار نقطه) بتوان یک تقریب چند وجهی پیدا کرد.

۴- روش اتخاذ شده برای پیاده سازی برنامه

نمایش در دستگاه مختصات استوانه ای

جسم مورد مطالعه ما در یک دستگاه محوره های مختصات استوانه ای (R, Z, θ) تعریف شده است، که در آن $R > 0$ و $0 \leq \theta < 2\pi$ و $-\infty < Z < \infty$ (برای $R = 0$ مقدار θ تعریف نشده است). نقاط رقمی شده روی یک شبکه منظم توپولوژیکی در حوزه تعریف (Z, θ) توزیع شده اند. این شبکه، یک شبکه منظم هندسی نیز هست زیرا که مقادیر نمونه گیری به کار رفته در



شکل ۱ - سیستم ضبط داده های سه بعدی

بسته نصف النهارها و کانتورهای مدارها هستند [۲].

۳- فرضیات روی سطح رقمی شده

یک نقطه در فضای اقلیدسی سه بعدی به وسیله سه مؤلفه x, y و z آن تعریف می شود. نقطه مزبور می تواند به وسیله سه مؤلفه دیگر در یک دستگاه مختصات دیگر تعریف شود. برای یک دستگاه مختصات (a, b, c) داده شده، فرض بر این است که:

الف - سطح جسم را می توان صریحاً در داخل مرزهای حوزه تعریف $D(S)$ با بیان یکی از مؤلفه ها (مثلاً c) به صورت تابعی از دو مؤلفه دیگر تعریف کرد: $c = s(a, b)$ ، که در آن s یک تابع پیوسته از مرتبه صفر است. یعنی به ازای هر جفت مؤلفه (a, b) متعلق به $D(S)$ تنها و تنها یک نقطه از رویه وجود دارد که به وسیله $(a, b, s(a, b))$ تعریف می شود.

ب - نمونه گیری سطح جسم بر روی یک شبکه منظم در میدان (a, b) از دستگاه مختصات (a, b, c) انجام پذیرفته است. این نظم، صرفاً یک نظم توپولوژیکی است. شبکه می تواند مشبک ای منظم از الگوهای سه گانه مثلث، مربع و یا شش ضلعی باشد. این طریقه نمونه گیری ما را قادر می سازد تا همسایه هر نقطه رقمی شده را تصریح کنیم. این روند، سبب ایجاد یک ساختار گراف گونه بر روی مجموعه نقاط داده ها می شود: $G = (V, E)$ که G گراف، V مجموع نقاط داده ها به عنوان رئوس، و E مجموعه یالهایی است که هر جفت رأس همسایه را به هم پیوند می دهد.

$$|R_{ij} - P(\theta_i, Z_j)| \quad (1)$$

بدیهی است که مقدار این خطا برای نقاطی از مبنای داده‌ها که به عنوان رئوس چند وجهی انتخاب می‌شوند برابر صفر است.

افراز مبنای داده‌ها

اکنون می‌خواهیم تناظر بین رئوس، اضلاع و سطوح یک PS و گراف G را در مجموعه نقاط S_{ij} به طور واضحتر بیان کنیم.

- رئوس PS

نقاطی از بین نقاط رقمی شده که در ضمن رئوس G را نیز تعریف می‌کنند.

- اضلاع PS

در حالت خاصی که ضلع L موازی یا عمود بر محور Z ها باشد، تصویر L در میدان (Z, θ) یک عبارت خطی از θ و Z است. در

حالت عمومی، مختصات θ یک نقطه M بر روی خط L یک تابع آرکتانژانت از Z است. فرض کنیم PSE ضلعی از PS باشد که دو

نقطه رقمی شده $S_{ij} = (\theta_i, Z_j, R_{ij})$ و $S_{kl} = (\theta_k, Z_l, R_{kl})$ را به هم وصل می‌کند. PSE به صورت قطعه منحنی آرکتانژانت در

حوزه تعریف (Z, θ) تعریف می‌شود که دو نقطه تصویر (θ_i, Z_j) و (θ_k, Z_l) را به هم وصل می‌کند. برای روند شکستن مثلثها نیاز

داریم که PSE را به مسیری از گراف G که دو راس PSE را به هم مرتبط می‌سازد، وابسته سازیم. این امر به شرطی امکانپذیر است که

پیوستگی درجه صفر تابع $s(\theta, Z)$ و خاصیت همبند بودن شبکه نمونه گیری شده را در نظر داشته باشیم. قطعه منحنی سه بعدی

روی رویه جسم را در نظر داشته باشیم که در ارتباط دو سوئی با PSE به وسیله تصویر استوانه ای ست. فرض کنیم $s(PSE)$ این

قطعه خط منحنی باشد. این خط خطوط ژئودزیک^۹ رسم شده روی رویه جسم به وسیله شبکه را قطع می‌کند و یک زیر مجموعه از

نقاط S_{ij} -۸ همسایه که در دو سوی $s(PSE)$ قرار دارند تعریف می‌کند. بنابراین این امکان به وجود می‌آید که PSE را به یک مسیر

از نقاط مرتبط S_{ij} که در همسایگی بلافاصله تصویر استوانه ای $s(PSE)$ قرار دارند، وابسته ساخت. زیر مجموعه نقاط -۸ همسایه

را بنابراین می‌توان در حوزه تعریف (Z, θ) به سادگی تعریف کرد، چراکه PSE و $s(PSE)$ دارای تصاویر همسانی در $D(s)$ هستند:

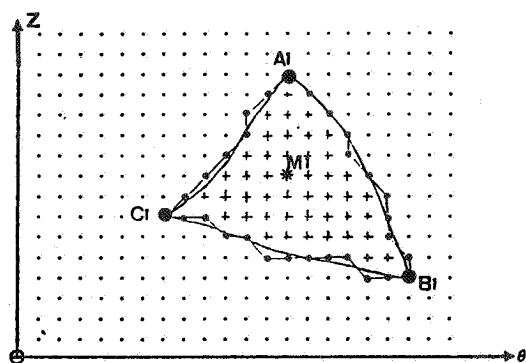
جهات Z, θ ثابت هستند. اگر یک دوران کامل حول محور Z ها انجام پذیرد حوزه تعریف $D(S)$ به قسمت مستطیل شکلی از حوزه (Z, θ) کاهش می‌یابد $Z_{min} \leq Z \leq Z_{max}$ و $(0 \leq \theta < 2\pi)$. نقاط رقمی $(\theta_j, Z_j, R_{ij}) = S_{ij}$ به طور منظم در $D(S)$ توزیع شده‌اند: $\theta_i = 2\pi i / NM$, $(i = 0, \dots, NM - 1)$, $Z_j = Z_{min} + j(Z_{max} - Z_{min}) / NP$, $(j = 0, \dots, NP - 1)$. NM و NP به ترتیب نمایشگر تعداد نصف النهارها و مدارهای حاصل از ضبط داده‌ها هستند. بدین ترتیب نمایش رویه رقمی شده در حوزه (Z, θ) دقیقاً مثل یک تصویر رقمی است که در آن سطرها و ستونها به ترتیب متناظر با مدارها و نصف النهارهای روی سطح جسم هستند و مقدار پیکسل در مکان (i, j) برابر با فاصله R_{ij} نقطه S_{ij} از محور Z هاست. منظم بودن شبکه این امکان را به ما می‌دهد تا برای هر نقطه در این شبکه همسایگیهای ۴ یا ۸- مرتبط تعریف کرد و مجموعه E از یالها را در گراف G مشخص کنیم.

انتخاب یک چند وجهی اولیه

در حدود حوزه تعریف $D(S)$ مشکلی برای تعیین یک PS اولیه نیست: ساده ترین راه این است که سه نقطه روی مدار اول به نحوی انتخاب کرد که مثلث حاصل از این سه نقطه محور Z ها را در درون مثلث تلاقی نکند. مثلث مشابهی را نیز می‌توان روی مدار آخر تشکیل داد. بدین طریق یک PS اولیه با ۶ وجه مثلثی با به هم پیوستن صحیح این دو مجموعه سه نقطه ای، به وسیله ۶ ضلع حاصل می‌شود. تقسیم تکراری این PS اولیه، در عمل این اطمینان را به ما خواهد داد تا برای هر PS حاصل، تابع $P(\theta, Z)$ در حوزه تعریف $D(S)$ وجود داشته باشد.

رابطه دوسویی

با توجه به مطالب فوق، رابطه دوسویی بین رویه جسم و تقریب چند وجهی، تصویر استوانه ای یکی بر روی دیگری خواهد بود (شکل ۲). به ویژه نقطه رقمی $(\theta_i, Z_j, R_{ij}) = S_{ij}$ به نقطه M از PS با رابطه $(\theta_i, Z_j, p(\theta_i, Z_j)) = M$ مربوط می‌شود. بنابراین خطای تقریب بین S_{ij} و نقطه همانند آن m ، به صورت قدر مطلق تفاضل شعاعهای آنها تعریف می‌شود:



شکل ۴ - نقاط داخلی منسوب به یک مثلث

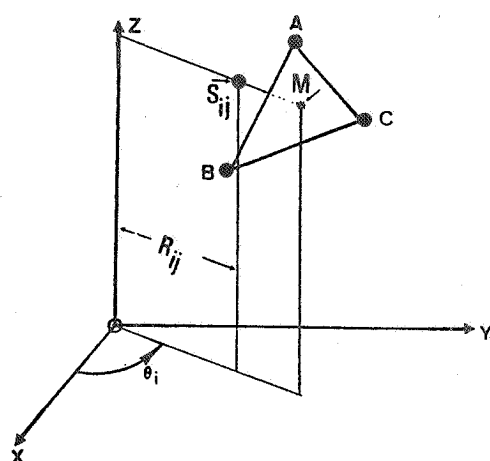


الف - زاویه بخش ناپذیر
ب - زاویه بخش پذیر
شکل ۵

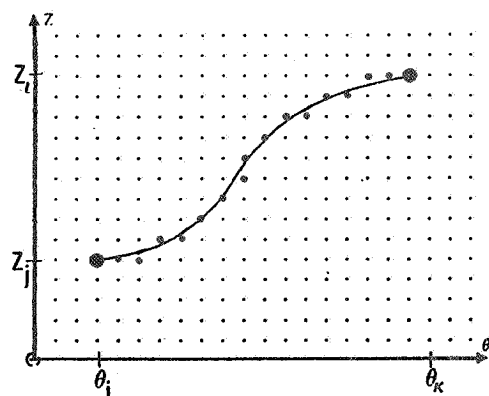
است که سه رأس مثلث نسبت به هم ۸- همسایه باشند. این چنین مثلثی بهترین تقریب مسطح موضعی برای رویه جسم است و احتیاجی به شکسته شدن بیشتر ندارد. به این ترتیب آفرازی از مجموعه نقاط رقمی شده S_{ij} به صورت نقاط، مسیرهای ۸- مرتبط و مؤلفه های همبند داخلی که به ترتیب وابسته به رئوس، اضلاع و وجوه PS هستند، به دست می آوریم.

- تعریف زاویه «بخش پذیر» و «بخش ناپذیر»

یک وجه مثلثی PS و تصویر آن را در $D(S)$ در نظر می گیریم. فرض کنیم که A یکی از سه رأس PS آن باشد. دو PSE که از رأس A در $D(s)$ شروع می شوند تشکیل یک زاویه منحنی الخط می دهند که تصویر گوشه متناظر مثلث است. در حین روند شکستن مثلث امکان پدید آمدن یک ضلع جدید بین A و PSE مقابل وجود دارد. تصویر این ضلع جدید در $D(S)$ زاویه فوق را دو قسمت می کند. ما تنها زمانی اجازه به وجود آمدن چنین ضلع جدیدی را خواهیم داد که زاویه A به اندازه کافی «منفرجه» باشد: تنها زمانی که مسیر ۸- مرتبط جدید، رأس مشترکی در A با دو مسیر - همبند مربوط به دو ضلع مشترک در A، نداشته باشد. بنابراین «زاویه بخش ناپذیر» را بدین صورت تعریف می کنیم که دو مسیر محدود کننده آن در



شکل ۲ - تصویر استوانه ای یک نقطه رقمی شده بر روی نقطه تقریب کننده آن

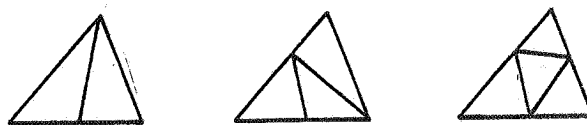
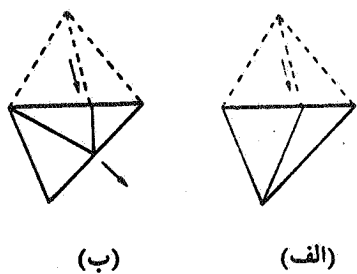


شکل ۳ - مسیر ۸- مرتبط منسوب به یک ضلع

قطعه ای از یک آرکتانژانت (شکل ۳). بدین ترتیب نقاط فوق را می توان مستقیماً با نمونه گیری از قطعه ای از آرکتانژانت با مقادیر گسسته θ_i و Z_i در شبکه منظم به وجود آورد.

- سطوح PS

در میدان (θ, Z) ، سه PSE یک وجه مثلثی PS، به وسیله سه قطعه آرکتانژانت تعریف می شوند. به علت منحصر به فرد بودن تابع $P(\theta, Z)$ ، این سه قطعه منحنی همدیگر را به جز در سه رأس PS قطع نخواهند کرد. این سه قطعه منحنی یک ناحیه داخلی را تعریف می کنند که تصویر سطح PS است، (شکل ۴). سه مسیر ۸- مرتبط وابسته به PSE یک مدار تشکیل می دهند که گراف G را به دو مؤلفه همبند مجزا می کند. یکی از مؤلفه ها در درون ناحیه داخلی قرار می گیرد که ما رئوس مربوطه را رئوس داخلی وجه PS می نامیم. مجموعه رئوس داخلی ممکن است خالی باشد، که این در حالتی



شکل ۶ - تقسیم یک مثلث به ۲، ۳ و ۴

همسایگی رأس مشترک، ۴- همسایه باشند، در غیر این صورت زاویه «بخش پذیر» است (شکل ۵).

۵- ساختار برنامه آماده سازی

برنامه با یک مرحله آماده سازی شروع می شود. از روی یک PS اولیه داده شده افزایش بر روی مجموعه نقاط رقمی S_{ij} اعمال می شود. به هر PSE، یک مسیر ۸- مرتبط وابسته می شود. به هر وجه PS، یک مؤلفه همبند دارای رئوس داخلی و برای تک تک زوایای آن نیز یک شاخص بخش پذیری و بخش ناپذیری نسبت داده می شود. بعد وجوه PS در دو مجموعه مجزا قرار می گیرند: مجموعه وجوه «خوب» که یک معیار کیفی را ارضا می کنند (تمام نقاط منسوب دارای تراز خطایی پایتتر از مقدار داده شده E هستند) و مجموعه وجوه «بد» PS که به طور رضایتبخشی رویه جسم را تقریب نمی کنند.

- مرحله تکرار

مجموعه وجوه «بد» در یک صف قرار می گیرند. این وجوه به طور تکراری تقسیم می شوند تا زمانی که همه آنها یک معیار کیفی را ارضا کنند. حلقه اصلی را می توان به سه مرحله تقسیم کرد:

i - مثلث «بد» T را از سر صف بردار. آن را با شکستن یک یا چند تا از اضلاع تقسیم کن.

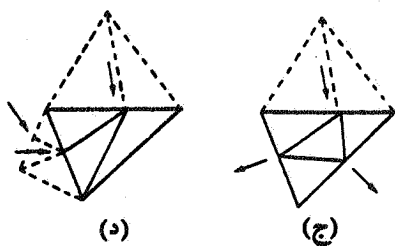
ii - همچنین مثلثهای مجاور را که در یک ضلع شکسته شده با T سهم هستند، تقسیم کن. روند تقسیم را تا زمانی که اضلاع تازه ای شکسته می شوند ادامه بده.

iii - توسط یک معیار کیفی تمام زیر مثلثهای تولید شده در داخل حلقه تکرار را آزمایش کن.

مثلثهای دارای ترازخطای بیشتر از E را در ته صف قرار بده و

(ب)

(الف)



(د)

(ج)

شکل ۷ - اثر توسعه تقسیم یک مثلث

دیگر مثلثها را در مجموعه وجوه «خوب» ذخیره کن. تا زمانی که صف تهی نیست حلقه اصلی تکرار می شود.

- استراتژی تقسیم مثلثها

یک مثلث ممکن است با دو قید زیر به ۲، ۳ و ۴ مثلث تقسیم شود (شکل ۶).

i - بخش پذیری زوایای آن

ii - سهم بودن در اضلاع شکسته شده توسط مثلثهای قبلاً تقسیم شده (اثر توسعه). برای محدود کردن اثر توسعه، اولویت اساسی به شکستن مثلث به دو قسمت داده می شود چراکه تنها یک ضلع شکسته می شود.

- انتخاب یک ضلع برای شکسته شدن در یک مثلث

برای مثلث T برداشته شده از بالای پشته در آغاز حلقه، طولانی ترین PSE را پیدا می کنیم. اگر رأس مقابل بخش پذیر بود آن گاه ضلع مزبور شکسته و مثلث T به دو قسمت تقسیم می شود در غیر این صورت دو ضلع دیگر T بررسی می شوند. اگر هیچکدام از رئوس مثلث بخش پذیر نبودند، مثلث T با شکستن هر سه ضلع آن، به چهار زیر مثلث تقسیم می شود. برای یک مثلث مجاور با یک ضلع قبلاً شکسته شده، اگر زاویه مقابل بخش پذیر باشد، مثلث فوق به دو قسمت تقسیم می شود و بنابراین عمل توسعه در این

جهت خاتمه می‌یابد (شکل ۷ - الف). اگر این زاویه بخش ناپذیر ولی یکی دیگر از زوایای آن بخش پذیر باشد مثلث به سه قسمت تقسیم می‌شود (شکل ۷ - ب). عمل تقسیم باید به ورای ضلع شکسته شده جدید توسعه یابد. اگر هیچ یک از زوایا بخش پذیر نبودند، باید مثلث را به چهار زیر مثلث تقسیم کنیم و عمل تقسیم را برای هر دو ضلع جدید شکسته شده توسعه دهیم (شکل ۷ - ج). در حین توسعه تقسیم، ممکن است قید روی یک مثلث تغییر یافته و با ۲ (یا حتی ۳) ضلع شکسته شده محکمتر شود. تقسیم چنین مثلثی باید، در صورت نیاز با تقسیم نمودن آن به سه قسمت بهنگام درآید (شکل ۷ - د).

انتخاب یک رأس برای شکستن یک ضلع

نقطه میانی مسیر وابسته به PSE کاندیدای خوبی برای شکستن ضلع است، چرا که در حالت تقسیم مثلث به ۲ زیر مثلث، ضلع جدید رابط بین آن نقطه و رأس مقابل PS، زاویه مزبور را تقریباً به دو زاویه مساوی تقسیم می‌کند. این استراتژی بخش پذیری، زوایای جدید را مساعدتر می‌سازد و خط مربوط به مشترک بودن رئوس در مسیرهای مجاور را کاهش می‌دهد.

۶- نتایج

برنامه پیاده سازی شده این امکان را به دست می‌دهد تا با دقت داده شده ϵ یک تقریب چند وجهی از سطح رقمی شده جسم با کنترل دقیق موضعی از کیفیت آن به دست آوریم. این برنامه همچنین به ما این امکان را می‌دهد تا با تعداد مثلثهای خواسته شده، بهترین تقریب را نتیجه بگیریم. این عمل، به وسیله تکرار بدنه اصلی برنامه با یک سری از تراز خطاهای نزولی ϵ_i انجام پذیر است. چند وجهی حاصل از یک مرحله تکرار با تراز خطای ϵ_i به عنوان یک چند وجهی اولیه برای تراز خطای کوچکتر ϵ_{i+1} به کار می‌رود. با انتخاب مناسب تفاضل $\epsilon_i - \epsilon_{i+1}$ در هر مرحله، می‌توان بر روی افزایش تعداد مثلثها کنترل داشت و در نتیجه تعداد آنها را به مقدار خواسته شده نزدیک کرد. چنین نحوه عمل برای شکستن مثلثها دارای سه مزیت عمده زیر است:

- ۱- اجتناب از مرتب سازی پرهزینه مثلثها بر حسب تراز خطای ماکزیم آنها در هر مرحله تکرار.
- ۲- به دست آوردن تقریبهای چند وجهی متوالی با یک کیفیت

هموژن از سطح جسم در کلیه نقاط.

۳- دوباره سازی سلسله مراتبی جسم با ترازهای کیفی صعودی. چرا که وجوه مثلثی در یک مرحله تکرار به مثلثهای کوچکتر برای مرحله بعد تبدیل می‌شوند.

این روش قابل تطبیق برای سطوح تعریف شده با ویژگیهای قید شده در قبل، در هر دستگاه مختصات سه بعدی است. برای نمونه، نتیجه اجرای این برنامه بر روی دو سطح تعریف شده در دستگاه مختصات استوانه ای و دکارتی به ترتیب در اشکال (۸) و (۹) آورده شده‌اند. در هر کدام از این مثالها تعداد $7200 = 120 \times 60$ نقطه توزیع شده روی سطح جسم در یک شبکه منظم توپولوژیکی انتخاب شده‌اند. از روی این ۷۲۰۰ نقطه، ۱۴۱۶۰ مثلث مقدماتی (کوچکترین مثلثی که بر روی نقاط داده‌های انتخاب شده می‌توان تشکیل داد) می‌توان تولید کرد. سپس بر روی این نقاط انتخاب شده مراحل مختلف مثلث بندی اعمال شده است.

شکل (۸) اجرای مراحل مختلف برنامه مثلث بندی را برای یک گلدان تعریف شده در یک دستگاه مختصات استوانه ای نشان می‌دهد. چند وجهی اولیه دارای ۳۲ وجه مثلثی است، (شکل ۸ - الف). در شکلهای (۸ - ب) الی (۸ - د) تقریبهای متوالی که به ترتیب دارای ۲۰۲، ۴۰۱ و ۲۰۰۲ مثلث هستند، به تصویر کشیده شده‌اند.

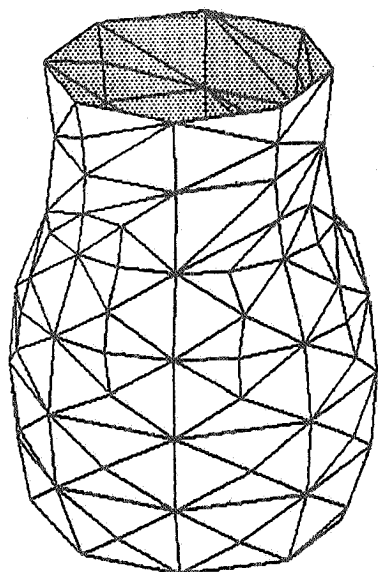
در شکل (۹)، مراحل مزبور بر روی سطح $z = \sin(y)$ تعریف شده در شبکه $[0..2]$ و $[0..2]$ نشان داده شده‌اند. در اینجا نیز چند وجهی اولیه دارای ۳۲ مثلث است (شکل ۹ - الف). شکلهای (۹ - ب) الی (۹ - د) تقریبهای متوالی را به ترتیب با ۲۰۱، ۴۱۰ و ۸۱۱ مثلث نشان می‌دهند.

برنامه به زبان توربو پاسکال نوشته شده و در محیط یک میکرو کامپیوتر سازگار با IBM PC با ریز پردازنده DX۲ ۴۸۶ با پالس ساعتی ۶۶ مگاهرتز اجرا شده است. زمان محاسبات برای شکلهای (۸) در جدول (۱) آورده شده است. می‌توان نشان داد که پیچیدگی محاسباتی برنامه از مرتبه $O(n^2)$ است که در آن n تعداد نقاط انتخاب شده (رقمی شده) روی سطح جسم و t تعداد مثلثهای به دست آمده است. برای حذف سطوح مخفی، با توجه به ویژگیهای خاص اجسام مورد مطالعه در این پروژه، تلفیقی از الگوریتم نقاش 10^{12} استفاده شده است. نخست سطوح مثلثی شکل بر حسب فاصله ماکزیم آنها از ناظر به صورت نزولی مرتب می‌شوند. سپس، این سطوح بر

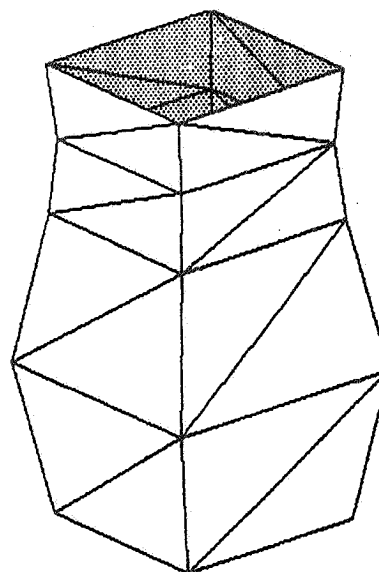
حسب فاصله شان از ناظر، به ترتیب بر روی صفحه دید ترسیم می شوند. پیچیدگی محاسباتی این قسمت برابر $O(n \log n)$ است.

جدول ۱ - زمان اجرای برنامه

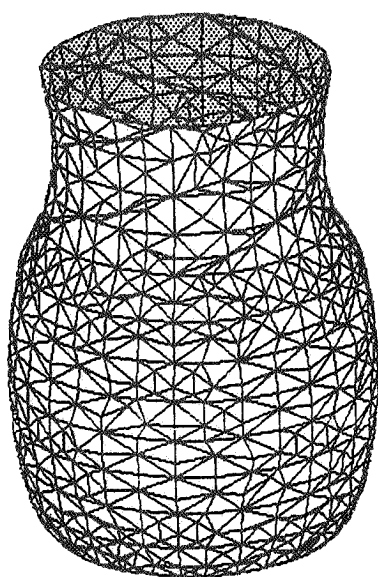
شکل (۸)	تعداد مثلثها	CPU بر حسب ثانیه
ب- ۱	۲۰۲	۱۸
ج- ۱	۴۰۱	$۱۸ + ۱۸ = ۳۶$
د- ۱	۲۰۰۲	$۴۷ + ۳۶ = ۸۳$



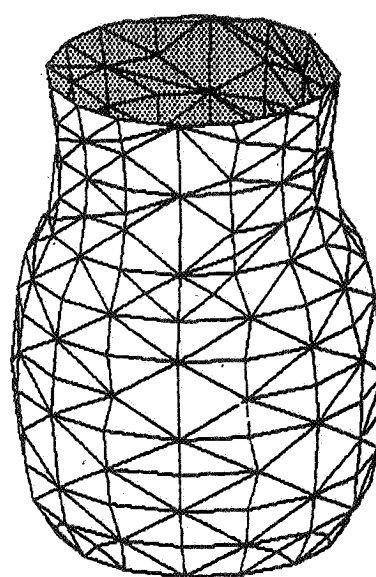
(ب)



(الف)

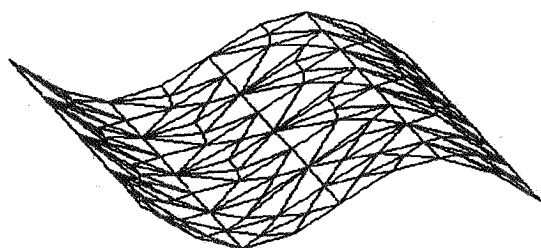


(د)

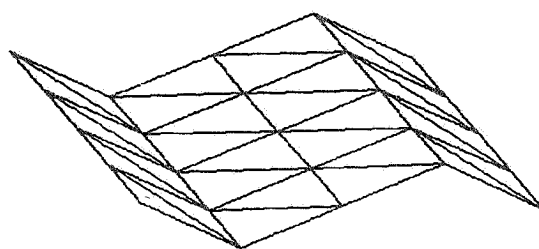


(ج)

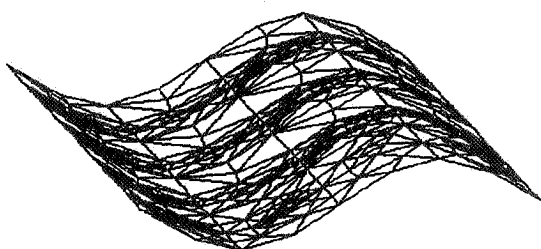
شکل ۸ - نتیجه اجرای چند مرحله از برنامه بر روی یک سطح تعریف شده در سیستم مختصات استوانه ای



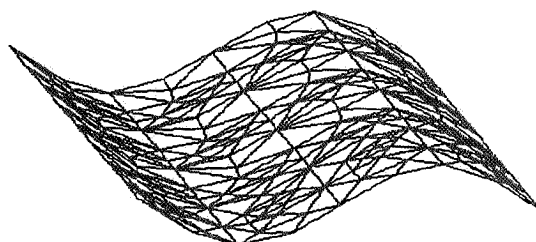
(ب)



(الف)



(د)



(ج)

شکل ۹ - نتیجه اجرای چند مرحله از برنامه بر روی یک سطح تعریف شده در سیستم مختصات دکارتی

واژه نامه

1. acquisition
2. representation
3. patch
4. octree

5. generalized cylinder
6. constructive solid geometry
7. tomography

8. Delaunay triangulation
9. geodesic
10. painter's algorithm

مراجع

1. Chen, X., and Schmitt, F., "Surface Modelling of Range Data by Constrained Triangulation", *CAD*, Vol. 26, No. 8, pp. 632-645, Aug. 1994.
2. Schmitt, F., Maitre, H., Clainchard, A. and Lopez-Krahe, J., "Acquisition and Representation of Real Object Surface Data," *SPIE Proc.*, Vol. 602 of *Biosterometrics Conference*, Cannes, France, 2-6 Dec. 1985.
3. Watt, A., *3D Computer Graphics*, Addison-Wesley, 1993.
4. Boissonat, J. D., "Representing Objects by Triangulation Points in 3D Space," *IEEE*, *6th International Conference on Pattern Recognition*, Munich, Germany, pp. 19-22, Oct. 1982.
5. Hermlin, F., "Triangulation automatique d'un polyèdre en dimension N," *RAIRO, Analyse Numérique/Numerical Analysis*, Vol. 16, No. 3, 1982.
6. Pauchon, Eric., "Reconstruction de la surface à partir des coupes," Thèse de Paris-Sud, Sept. 1983.
7. Gholizadeh, B., "Représentation par triangulation de la surface d'objets 3D," Thèse de Paris-Sud, Dec. 1985.
8. Day, A., "The Implementation of an Algorithm to Find the Convex Hull of a Set of 3D Points," *ACM*, Vol. 9, No. 1, Jan. 1990.
9. Preparata, F. P., and Shamos, M. I., *Computational*

Geometry, Springer Verlag, 1988.

10. Barry, J., "Construction of Three Dimensional Delaunay Triangulation Using Local Transformations," *CAGD*, Vol. 8, No. 2, pp. 123-142, May 1991.

11. Faugeras, O. D. and Herbert, M., "Polyhedral

Approximation of 3D Objects without Holes,"

CVGIP, Vol. 25, pp. 169-183, 1984.

12. Hill Jr., F. S., *Computer Graphics*, McMillan Publishing Company, 1990.