

طراحی و پیاده سازی یک سیستم فتوگرامتری رقومی برد کوتاه جهت بازسازی اتوماتیک سطح صورت انسان

جعفر امیری پریان

فارغ التحصیل کارشناسی ارشد رشته مهندسی نقشه برداری - دانشکده فنی - دانشگاه تهران

علی عزیزی

دانشیار گروه مهندسی نقشه برداری - دانشکده فنی - دانشگاه تهران

(تاریخ دریافت ۸۱/۴/۱۱، تاریخ تصویب ۸۳/۸/۱۶)

چکیده

اندازه گیری و مدلسازی سه بعدی سطح صورت انسان در زمینه پزشکی و متحرک سازی کاربردهای فراوانی دارد. برای این منظور روش های متعددی برای بازسازی سطح صورت بکار گرفته شده اند که متداول ترین آنها فتوگرامتری رقومی، پوشش لیزر و نور ساختار یافته است. در این مقاله یک سیستم اتوماتیک برای اندازه گیری و بازسازی سطح صورت انسان توسط روش فتوگرامتری رقومی برد کوتاه طراحی و پیاده سازی شده است و نتایج عددی از یک نمونه واقعی ارائه می شود. در این سیستم، عکسبرداری از صورت انسان بر اساس طراحی شبکه فتوگرامتری برد کوتاه، توسط یک دوربین آماتور از حداقل هفت ایستگاه همگرا صورت گرفت. محاسبات کالیبراسیون و توجیه خارجی توسط یک شبکه نقاط کنترل سه بعدی که برای این منظور ایجاد و محاسبه گردید، صورت گرفته است. برای اینکه محاسبات تناظریابی امکان پذیر باشد، بافت مصنوعی بر صورت ایجاد شد و تناظریابی به روش Adaptive least squares multi image matching با محاسبه بیش از ۱۸۰۰۰ نقطه تناظر صورت گرفت. محاسبات بازسازی توسط تقاطع فضایی و با در نظر گرفتن پارامترهای کالیبراسیون انجام و سطح سه بعدی صورت انسان با دقت متوسط ۰/۷ میلی متر محاسبه گردید. برای ارائه نتایج متناسب با کاربردهای فوق، سطح صورت به دو شیوه منحنی میزان و نورپردازی شده نمایش داده شده است.

کلید واژه ها: فتوگرامتری پزشکی، مهندسی پزشکی، تناظریابی رقومی، طراحی شبکه، کالیبراسیون دوربین

مقدمه

در حال حاضر روش های متعددی جهت تولید مدل سه بعدی صورت انسان بکار گرفته شده اند. کاربردی ترین و معروفترین آنها پوشش لیزر^۳، نور کد شده^۴ بر مبنای مثلث بندی^۵ و روش فتوگرامتری رقومی است. روش پوشش لیزر به طور گسترده ای در دنیای متحرک سازی کامپیوتر بکار گرفته شده است و محصولات نرم افزاری فراوانی جهت مدلسازی سه بعدی و خصوصاً مدلسازی صورت انسان بر پایه این روش به وجود آمده اند [۵]. این سیستم شامل دسته اشعه لیزر و دوربین ویدیویی است که در مدت زمان ۳۰ ثانیه سطح صورت را از روبرو جاروب می نماید. دقت این روش حدود ۰/۵ میلی متر است.

دومین روش متداول استفاده از نور کد شده بر پایه روش مثلث بندی است [۲۰]. این سیستم که شامل یک

جهت ارزیابی تغییرات آناتومی سطح در جراحی پلاستیک و جراحی فک و دندان، دانستن شکل و اندازه صورت بیمار قبل از عملیات جراحی لازم است. دو روش متفاوت جهت مدلسازی سطح صورت انسان وجود دارد. در یک روش هدف دقت بالا و دیگری مدلسازی مناسب از سطح صورت بدون دقت بالاست. روش دوم در دنیای متحرک سازی^۱ کامپیوتر مرسوم است [۱۱] و روش اول در کاربردهای پزشکی از قبیل برنامه ریزی عملیات جراحی [۱۲] یا اندازه گیری تغییرات سطح پس از عملیات جراحی به صورت دوره ای/مقایسه ای و یا پیش بینی نتیجه عملیات جراحی صورت مورد استفاده قرار گرفته است که با مدلسازی سطح توسط اجزاء محدود^۲ و اعمال پارامترهای مختلف، تغییر شکل محاسبه و نمایش داده می شود [۱۶].

- کالیبراسیون یک دوربین zoom lens آماتور.
- ارائه یک روش ابتکاری برای انجام توجیه داخلی برای یک دوربین آماتور با فرمت فیلم.

طراحی سیستم اتوماتیک اندازه‌گیری سطح صورت انسان

اجزای تشکیل دهنده سیستم اتوماتیک اندازه‌گیری سطح صورت در شکل (۱) ارائه شده است. این سیستم از سه قسمت اصلی تشکیل گردیده است که به ترتیب عبارتند از: ورودی اطلاعات، پردازش اطلاعات و خروجی که مدل سه بعدی است.

عکسبرداری بر اساس طراحی شبکه فتوگرامتری با یک دوربین آماتور از حداقل هفت ایستگاه همگرا با پیکربندی یک شبکه فتوگرامتری برد کوتاه و در نظر گرفتن دو زیر شبکه با یک ایستگاه مشترک، انجام گردید (جزئیات این شبکه در قسمت عکسبرداری مورد بحث قرار گرفته است). از آنجاییکه بافت صورت اطلاعات کافی برای محاسبات تناظریابی ندارد قبل از عکسبرداری بافت مصنوعی حاوی اطلاعات خطی، نقطه‌ای و طیفی بر روی صورت ایجاد شد. محاسبات پارامترهای کالیبراسیون و المان‌های توجیه خارجی دوربین با استفاده از یک شبکه نقاط کنترل سه بعدی که به این منظور طراحی، ایجاد، اندازه‌گیری و محاسبه شده، صورت گرفت. محاسبات تناظریابی بر پایه روش Adaptive least squares multi image matching است که نقاط متناظر بر اساس کمینه نمودن مجموع مربعات اختلاف درجات خاکستری بین دو ناحیه انتخاب شده از تصاویر محاسبه می‌شوند. بازسازی سطح توسط معادلات تقاطع فضایی با در نظر گرفتن پارامترهای کالیبراسیون دوربین انجام گرفت. نقاط سه بعدی محاسبه شده در فضای شیء به روش مثلث‌بندی دلونی نقاط نا منظم، مدل‌سازی شدند و به منظور ارائه نمایش بهتر با توجه به کاربرد در زمینه پزشکی به دو روش منحنی میزان و نورپردازی شده نمایش داده شدند. زمان عکسبرداری حدود ۲۰ ثانیه و دقت سطح بازسازی شده در فضای شیء با مقیاس ۱:۲۲ به‌طور متوسط برابر ۰/۷ میلی‌متر ارزیابی گردید.

دوربین و پروژکتور است به سهولت نصب می‌شود و به سادگی قابل استفاده است به همین دلیل در شاخه صنعت متداول است. این روش برای اشیاء ساکن (موضوعات Static) بهینه است و برای موضوعات با سطوح مرکب مانند صورت انسان، لازم است از زوایای مختلف برداشت‌های متفاوتی صورت پذیرد که افزایش زمان جمع‌آوری اطلاعات را به همراه خواهد داشت.

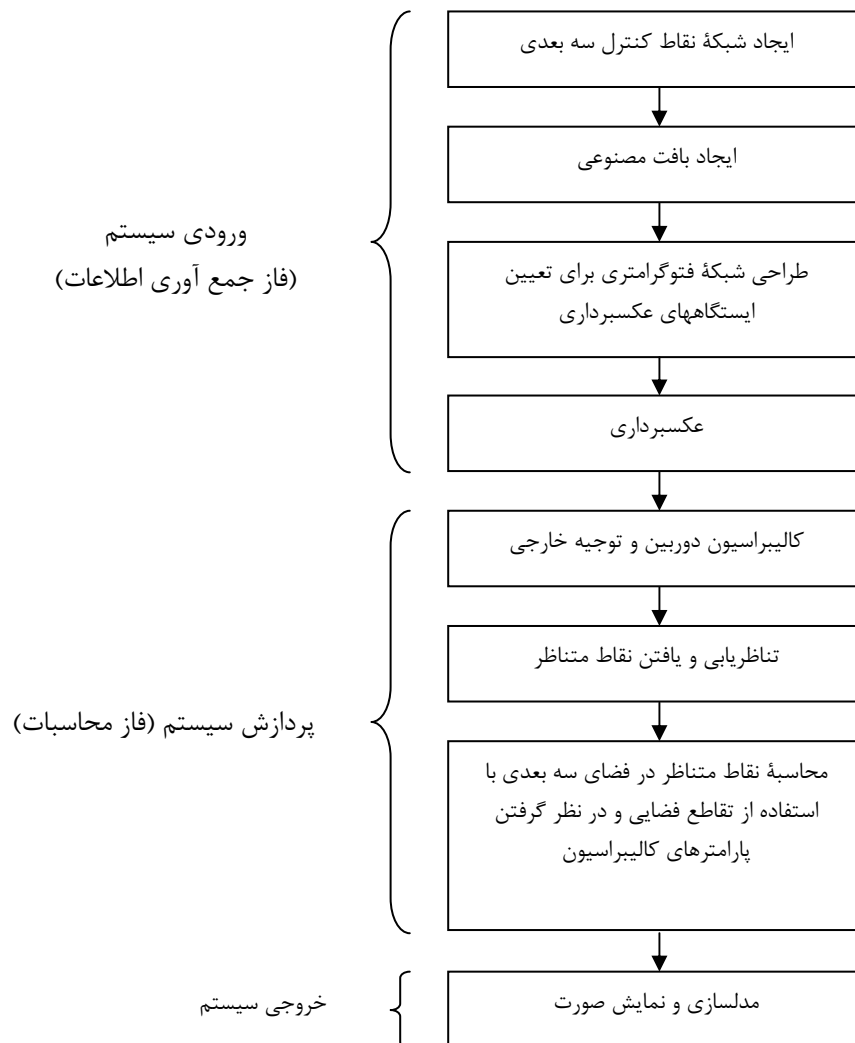
روش فتوگرامتری رقومی [۷ و ۱۴] ایستگاههای مختلفی را برای برداشت تصاویر از یک شیء بکار می‌گیرد و می‌تواند پوشش کامل از سطح صورت ارائه دهد. بر خلاف روش‌های فوق که روش‌های active هستند روش فتوگرامتری یک روش passive است یعنی با نور معمولی ولی با تصویربرداری استریو مدل سه بعدی سطح را محاسبه می‌نماید.

تحقیقات قبلی در این زمینه برای پیاده سازی یک سیستم جهت اندازه‌گیری و مدل‌سازی سطح صورت انسان به سال ۱۹۹۷ D'Apozzo [۶] باز می‌گردد. در این تحقیق از یک دوربین در پنج ایستگاه و یک پروژکتور برای تصویر بافت مصنوعی بر صورت، جهت اندازه‌گیری سطح یک ماسک صورت استفاده گردید. در سال ۱۹۹۸ D'Apozzo [۷] سیستم خود را بهینه ساخت و از ۵ دوربین و ۲ پروژکتور برای تصویر بافت مصنوعی بر روی صورت انسان استفاده نمود.

در این مقاله اصول و مبانی طراحی و پیاده‌سازی یک سیستم فتوگرامتری برد کوتاه ارزیابی به منظور اندازه‌گیری و مدل‌سازی سطح سه بعدی دقیق صورت انسان به همراه دقت برآورد شده و نتایج بازسازی سطح صورت برای یک نمونه واقعی ارائه می‌گردد.

این تحقیق دارای ویژگی‌های زیر نسبت به کارهای قبلی [۶، ۷ و ۱۴] در این زمینه و سایر کارهای مرتبط با آن است:

- ارائه یک الگوریتم تناظریابی جدید بر مبنای مفاهیم Adaptive least square image matching با در نظر گرفتن چند عکس و استفاده از هشت پارامتر تبدیل هندسی پروجکتیو.
- تعیین ایستگاهها و پارامترهای عکسبرداری بر مبنای طراحی شبکه فتوگرامتری برد کوتاه.



شکل ۱: نمایش سیستم اتوماتیک اندازه‌گیری و مدلسازی سطح صورت انسان.

محاسبه شده داشت و از طرفی بتوان خطاهای فاحش را کشف نمود [۱۳].

قانون ۲- دقت بهینه تخمین زده شده برای مختصات یک نقطه در فضای شیء زمانی حاصل می‌شود که دسته اشعه‌های اشاره شده در قانون ۱ دارای زاویه تقارب ۹۰ تا ۱۰۰ درجه باشند [۱۰].

- ۱) قید مقیاس عکسبرداری
- ۲) قید میدان دید^۶
- ۳) قید عمق میدان^۷
- ۴) قید قدرت تفکیک
- ۵) قید فضای کار
- ۶) قید دید

عکسبرداری

عکسبرداری توسط یک دوربین آماتور Canon Eos 630 Zoom Lens با فاصله کانونی ۷۰ میلی‌متر و با فاصله جسم تا دوربین ۱/۵ متر و بر مبنای طراحی شبکه ایستگاههای عکسبرداری فتوگرامتری برد کوتاه از حداقل هفت ایستگاه همگرا صورت گرفت. بخاطر پیچیدگی سطح صورت انسان از زیر شبکه‌ها استفاده شده است. هر زیر شبکه مربوط به ناحیه‌ای عموماً مسطح از سطح صورت انسان است که با توجه به دو قانون و هشت قید زیر طراحی شده‌اند:

قانون ۱- هر نقطه در فضای شیء باید حداقل توسط چهار دسته اشعه قطع شود تا اطمینان کافی به مختصات

هندسی توسط این نقاط، پارامترهای تبدیل هندسی سیستم مختصات تصویر رقومی و سیستم مختصات مرکز فیلم - سیستم مختصات فیزیکی در زمان عکسبرداری - محاسبه می‌شوند. بنابراین پارامترهای x_0, y_0 برای تصاویر مختلف در یک سیستم مختصات واحد (مرکز فیلم) به صورت ثابت وارد محاسبات خواهند شد.

در دوربین آماتور بکارگرفته شده در این تحقیق، قابلیت ثبت نقاط گوشه‌ای یا نقاط کناری وجود ندارد. در این مقاله یک روش ابتکاری برای ایجاد نقاط گوشه‌ای ارائه می‌شود.

در این روش نقاط چهار گوشه کادر فیلم بعنوان نقاط گوشه‌ای در نظر گرفته شدند. برای بدست آوردن محل دقیق این نقاط در تصاویر لبه‌های بالا، پایین، چپ و راست فیلم بطور متوسط با ۸ نقطه برای هر لبه در فواصل مساوی قرائت گردید (شکل ۳). توسط نقاط قرائت شده معادله خط لبه‌های بالا، پایین، راست و چپ هر فیلم به روش کمترین مربعات محاسبه و با تقاطع این خطوط مختصات چهار نقطه گوشه‌ای فیلم محاسبه گردیدند. با توجه به ابعاد فیلم که 36×24 میلی‌متر است، مختصات چهار گوشه فیلم برابر $(-12, 18)$ ، $(12, 18)$ ، $(12, -18)$ و $(-12, -18)$ میلی‌متر در نظر گرفته شدند. پارامترهای توجیه داخلی بین سیستم مختصات تصاویر رقومی و سیستم مختصات مرکز فیلم با انتخاب یک ترانسفورماسیون هم فاصله و هم زاویه (ترانسفورماسیون conformal) و روش کمترین مربعات محاسبه گردید. با ارزیابی مانده‌ها بیشترین مانده این سرشکنی ۴۲ میکرون و متوسط مانده‌ها حدود ۲۱ میکرون بدست آمد. به این ترتیب پارامترهای ترانسفورماسیون با توجه به اندازه هر پیکسل ۲۱ میکرون به خوبی محاسبه شدند.

از طرفی در زمان عکسبرداری فاصله اصلی (C)، فاصله صفحه فیلم از عدسی، ثابت و برابر فاصله کانونی ۷۰ میلی‌متر و فاصله دوربین تا جسم برابر ۱/۵ متر در نظر گرفته شد. به این ترتیب پارامترهای توجیه داخلی به صورت block invariant وارد محاسبات کالیبراسیون گردیدند.

معادله ریاضی DLT به همراه پارامترهای اضافی که برای کالیبراسیون و توجیه خارجی بکار گرفته شد به صورت رابطه (۱) فرمولسازی گردید [۴]:

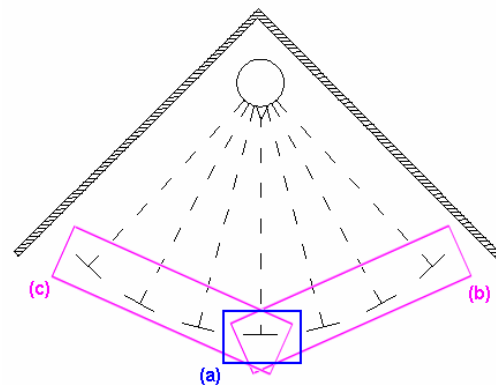
(۷) قید زاویه میل^۸

(۸) قید توزیع نقاط کنترل

شکل (۲) وضعیت ایستگاههای عکسبرداری و زیر شبکه‌ها را که بر مبنای قوانین و قیود فوق محاسبه شده‌اند نشان می‌دهد.

کالیبراسیون - توجیه داخلی و خارجی

روش سلف کالیبراسیون با پارامترهای اضافی^۹ Brown به عنوان پارامترهای اضافی و مدل ریاضی DLT بعنوان ارتباط دهنده فضای شیء و عکس، به عنوان معادلات اساسی سلف کالیبراسیون در نظر گرفته شده‌اند [۲۱ و ۱]. برای حل معادلات سلف کالیبراسیون، پارامترهای توجیه داخلی: C، فاصله اصلی، x_0, y_0 جابجایی مرکز سیستم مختصات اختیاری و مرکز اصلی،



شکل ۲: نمایش ایستگاههای عکسبرداری بر اساس قواعد طراحی شبکه برد کوتاه.

چهار ایستگاه برای نیمه راست صورت (c) و

چهار ایستگاه برای نیمه چپ صورت (b) با در نظر گرفتن

یک ایستگاه مشترک برای اتصال دو زیر شبکه (a).

در عکس‌های مورد استفاده block invariant در نظر گرفته می‌شود [۸]. دلیل اصلی این کار جلوگیری از over parameterization معادلات و در نتیجه افزایش دقت و اطمینان به محاسبات کالیبراسیون است. در دوربین‌های متریک فتوگرامتری نقاط مشخصی (نقاط گوشه‌ای و نقاط کناری) بر گوشه و حاشیه فیلم ثبت می‌شوند که مختصات دقیق آنها مشخص است. پس از رقومی نمودن فیلم با هدف محاسبات رقومی مانند: تناظریابی رقومی، این علائم در سیستم مختصات تصویر (سطر و ستون) اندازه‌گیری می‌شوند. با انجام تبدیل

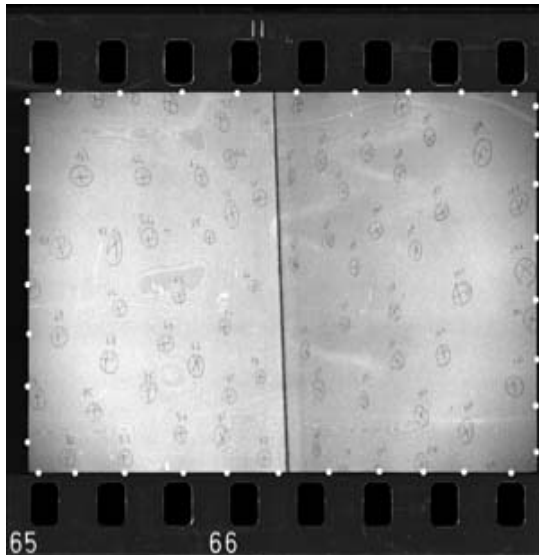
ضرایب بیان کننده صاف نبودن فیلم،
 ضرایب اعوجاج شعاعی عدسی،
 ضرایب اعوجاج ناشی از خروج از
 مرکز عدسی و
 تصحیحات به پارامترهای توجیه
 داخلی.

c_1, \dots, c_3

k_1, k_2, k_3

p_1, p_2

$\delta_{x_0}, \delta_{y_0}, \delta_c$



شکل ۳: نمایش نقاط قرائت شده بر لبه فیلم با هدف محاسبه نقاط گوشه‌ای در مرحله توجیه داخلی.

با خطی نمودن معادله (۱) نسبت به پارامترهای اضافی و ۱۱ مجهول ترانسفورماسیون DLT و حل کمترین مربعات، پارامترهای توجیه خارجی و پارامترهای کالیبراسیون دوربین محاسبه می‌شوند.

برای این محاسبات شبکه نقاط کنترل سه بعدی (شکل ۴) با مشخصات جدول (۱) ایجاد گردید.

شبکه نقاط کنترل سه بعدی در فضای شیء به منظور برقراری ارتباط هندسی آن فضا و فضای تصویر با یافتن پارامترهای توجیه خارجی و برخی پارامترهای اضافی، ایجاد و مورد استفاده قرار گرفته است.

جدول ۱: مشخصات شبکه نقاط کنترل سه بعدی.

تعداد نقاط:	۲۶۶
عمق شبکه:	۳۵ سانتیمتر
متوسط دقت موقعیت:	۰/۷ میلیمتر
ابعاد شبکه (سانتیمتر):	۱۱۵×۱۱۵×۱۱۵

$$f = -\Delta x + \frac{L_1 X + L_2 Y + L_3 Z + L_4}{L_9 X + L_{10} Y + L_{11} Z + 1}$$

$$g = -\Delta y + \frac{L_5 X + L_6 Y + L_7 Z + L_8}{L_9 X + L_{10} Y + L_{11} Z + 1}$$

$$x = f$$

$$y = g$$

(۱)

که در آن: (X, Y, Z) مختصات سه بعدی نقطه‌ای در فضای شیئی و (x, y) مختصات دو بعدی نقطه متناظر با نقطه شیئی در سیستم مختصات عکس است. توسط L_1, \dots, L_{11} یازده پارامتر ترانسفورماسیون 3D به 2D ارتباط نقطه شیئی و نقطه عکسی برقرار می‌شود. پارامترهای اضافی، علاوه بر محاسبه دقیق پارامترهای توجیه داخلی، خطاهای سیستماتیک یا نقص مدل ریاضی را برای یک دوربین غیر متریک مدل می‌نمایند. این پارامترها با هدف اعمال تصحیحاتی به معادلات ریاضی یک دوربین غیر متریک، آن معادلات را به معادلات ریاضی یک دوربین واقعی^{۱۰} (دوربین ایده‌آل) نزدیک می‌نمایند. این پارامترها به صورت رابطه (۲) تعریف شده‌اند [۲۱].

$$\Delta x = a_1 x + a_2 y + a_3 x^2 + a_4 xy + a_5 y^2$$

$$+ \frac{x}{r} (c_1 x^2 + c_2 xy + c_3 y^2)$$

$$+ x(k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6)$$

$$+ p_1 (y^2 + 2x^2) + 2p_2 xy$$

$$+ \delta_{x_0} + \left(\frac{x}{c}\right) \delta_c$$

$$\Delta y = b_1 x + b_2 y + b_3 x^2 + b_4 xy + b_5 y^2$$

$$+ \frac{y}{r} (c_1 x^2 + c_2 xy + c_3 y^2)$$

$$+ y(k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6)$$

$$+ 2p_1 xy + p_2 (x^2 + 2y^2)$$

$$+ \delta_{y_0} + \left(\frac{y}{c}\right) \delta_c \quad (2)$$

که $r = x^2 + y^2$ است.

هر گروه از پارامترهای رابطه (۲) مربوط به خطاهایی هستند که به صورت زیر دسته‌بندی شده‌اند:

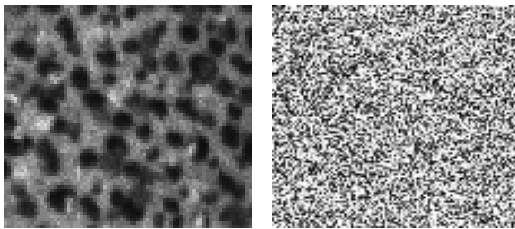
$$\left\{ \begin{array}{l} a_1, \dots, a_5 \\ b_1, \dots, b_5 \end{array} \right. \text{ ضرایب بیان کننده تغییر شکل فیلم،}$$

و در صورتی که بافت خصوصیات هر یک از آن روش‌ها را داشته باشد محاسبات تناظریابی امکان پذیر است.

سطح صورت انسان بافت کافی برای محاسبات تناظریابی ندارد. برای اینکه بافت مناسب برای محاسبات تناظریابی فراهم شود بافت مصنوعی بر روی صورت ایجاد گردید. این بافت می‌تواند به دو روش کاملاً متفاوت بر روی صورت ایجاد گردد:

(۱) در این روش ابتدا الگوی^{۱۳} طراحی شده بر روی کاغذ ترانسپرنسی ترسیم می‌گردد (شکل ۵-الف) سپس بدون تماس مستقیم با صورت توسط پروژکتور بر روی صورت تصویر می‌شود. این روش یک روش متداول برای ایجاد بافت مصنوعی بر صورت است [۲ و ۷].

(۲) در این روش بافت بوسیله قلم مو و آبرنگ و با تماس مستقیم بر روی صورت ایجاد می‌گردد (شکل ۵-ب).



الف ب

شکل ۵: قطعه‌ای از بافت مصنوعی استفاده شده. الف) بافت طراحی شده به روش اول. ب) بافت طراحی شده به روش دوم.

طرح بافت با توجه به روش تناظریابی، رنگ پوست و مقیاس عکسبرداری تعیین می‌شود. در صورتی که رنگ پوست تیره باشد روش اول کارایی چندانی ندارد. در روش دوم با استفاده از رنگ‌های روشن برای صورت با رنگ تیره و استفاده از رنگ‌های تارک برای صورت با رنگ روشن محدودیت رنگ پوست وجود نخواهد داشت. با این وجود اجرای روش دوم زمانبر است و از معایب آن بشمار می‌رود. با ایجاد بافت مناسب برای تناظریابی، این محاسبات به روش Adaptive least squares multi image matching صورت گرفت که دارای خصوصیات زیر است:

(۱) کمترین مربعات^{۱۴} بر مبنای روش Levenberg-Marquart (LM)

جدول ۲: برخی پارامترهای کالیبراسیون محاسبه شده.

حالت	۱	۲	۳	۴
پارامتر				
$c (mm)$	۱۷۹۷ ۶۵	۶۵/۹۷۰	۶۵/۵۰۹	۶۵/۹۰۶
$x_0 (mm)$	۰/۱۷۱ -	-۰/۱۶۱	-۰/۱۶۱	-۰/۳۰۱
$y_0 (mm)$	۰/۱۵۵	۰/۱۵۷	۰/۱۶۲	۰/۲۱۱
$k_1 (\times 10^{-6})$	----	۲۰/۴۱۲	۲۰/۴۱۲	۲۰/۴۲۹
$k_2 (\times 10^{-8})$	----	----	-۷/۳۹۵	-۷/۵۲۰
$k_3 (\times 10^{-11})$	----	----	۹/۸۰۷	۱۰/۱۱۹
$p_1 (\times 10^{-5})$	----	----	---	-۱/۳۶۳
$p_2 (\times 10^{-6})$	----	----	---	۴/۴۵۶

جدول (۲) برخی از پارامترهای کالیبراسیون محاسبه شده را در چهار حالت مختلف نشان می‌دهد. در حالت اول تنها سه پارامتر c, y_0, x_0 بعنوان پارامترهای اضافی وارد محاسبات گردیدند. حالت دوم با در نظر گرفتن پارامترهای حالت اول و افزودن مؤثرترین پارامتر اعوجاج شعاعی انجام گردید. در حالت سوم دو پارامتر دیگر اعوجاج شعاعی بعنوان پارامترهای اضافی به حالت دوم اضافه گردیدند و در حالت چهارم علاوه بر وجود پارامترهای حالت سوم دو پارامتر مربوط به اعوجاج حاصل از خروج از مرکز عدسی نیز در نظر گرفته شدند. با توجه به دقت شبکه نقاط کنترل برابر ۰/۷ میلیمتر و ارزیابی مانده‌های سرشکنی در نقاط کنترل و نقاط check، سه پارامتر c, y_0, x_0 از مؤثرترین پارامترهای کالیبراسیون شناخته شدند. با در نظر گرفتن این سه پارامتر دقت محاسبات کالیبراسیون در فضای شیء به طور متوسط برابر ۰/۷ میلیمتر و در فضای تصویر به طور متوسط برابر ۰/۳ پیکسل ارزیابی گردید.

تناظریابی

در تناظریابی هدف یافتن پارامترهای ایجاد ارتباط هندسی و طیفی بین دو تصویر مختلف است. روش‌های مختلفی برای ایجاد این ارتباط بکارگرفته شده‌اند که روش‌های ناحیه مبنا^{۱۱} و عارضه مبنا^{۱۲} از متداولترین این روش‌ها هستند. این روش‌ها وابسته به بافت تصویر هستند

ابعاد پنجره‌ای که در تصویر اول انتخاب می‌شود باید طوری در نظر گرفته شود که پنجره، حاوی بافت کافی برای محاسبات تناظریابی باشد. در این تحقیق ابعاد پنجره به صورت ابتکاری به روش جستجو و با کمک خصوصیات روشهای عارضه مبنا تعیین گردید. برای یافتن اندازه یک پنجره که دارای بافت مناسب برای محاسبات تناظریابی ناحیه مبنا باشد از معیار q طبق رابطه (۴) استفاده گردید [۱۵].

$$q = \frac{4 \det(N)}{\text{trace}(N)^2} \quad (4)$$

در این رابطه، N ماتریس نرمال اپراتور Forstner است و به صورت زیر تعریف می‌شود [۱۵]:

$$N = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^m f_{ci}^2 & \pm \sum_{i=1}^m f_{ri} f_{ci} \\ \pm \sum_{i=1}^m f_{ri} f_{ci} & \sum_{i=1}^m f_{ri}^2 \end{bmatrix} \quad (5)$$

در رابطه بالا $f(r,c)$ پنجره با ابعاد $m_r \times m_c$ و m برابر $m_r m_c$ است. f_r, f_c مشتقات جهتی در امتداد محورهای مختصات فضای تصویر، r و c هستند. اگر معیار q برای پنجره‌ای با ابعاد $m_r \times m_c$ از مقدار q_{min} (حد آستانه) بزرگتر باشد به این معنی است که آن پنجره دارای عارضه مبنا به شکل دایره یا گوشه است و در صورتی که معیار q از مقدار حد آستانه کوچکتر باشد ابعاد پنجره با یک مقدار ثابت مرتباً افزایش می‌یابد تا زمانی که q از حد آستانه بزرگتر شود. انتخاب پنجره با خصوصیات تعریف شده وجود بافت مناسب برای محاسبات تناظریابی را تضمین می‌نماید و منجر به محاسبات تناظریابی دقیق‌تر و مطمئن‌تر خواهد شد.

تصاویر مورد استفاده در تناظریابی، تیلت نسبتاً زیادی نسبت به سطح و نسبت به یکدیگر دارند بنابراین تنها استفاده از ترانسفورماسیون پروجکتیو می‌تواند ارتباط دقیق هندسی بین پنجره‌ها را برقرار سازد. استفاده از چنین ترانسفورماسیونی بخاطر حساسیت نکاشت نسبت به ضرایب مخرج کسر و وابستگی برخی پارامترها نسبت به یکدیگر منجر به حل غیر دقیق و ناپایدار خواهد شد. چنین پیچیدگی‌ای باعث شده است که تناظریابی تصاویر با تیلت زیاد، به دشواری و با پیشنهاد بکارگیری روش‌های

(۲) چند عکس^{۱۵}
(۳) انطباقی^{۱۶} برای انتخاب اندازه پنجره و انتخاب پارامترهای ترانسفورماسیون هندسی.
تناظریابی برای هر نیمه صورت (هر زیر شبکه) توسط سه تصویر (شکل (۶) نمایش تصویر صورت در موقعیت a از شکل (۲) است) و مجموعاً توسط شش تصویر برای کل صورت و به روش ناحیه مبنا توسط رابطه (۳) انجام گردید [۲]:

$$f(x,y) + n(x,y) = g(u,v) \quad (3-f)$$

$$u = \frac{a_1 x + a_2 y + a_3}{a_7 x + a_8 y + 1}$$

$$v = \frac{a_4 x + a_5 y + a_6}{a_7 x + a_8 y + 1} \quad (3-b)$$

در این رابطه $n(x,y)$ نویز تصویر، $f(x,y)$ پنجره در تصویر اول^{۱۷}، $g(x,y)$ پنجره در تصویر دوم یا سوم^{۱۸} که به صورت تقریبی متناظر الگو در تصویر اول است. ضرایب ترانسفورماسیون پروجکتیو هستند که توسط آنها ارتباط مکانی پیکسل‌ها بین الگو و پنجره‌ها) برقرار می‌شود.

برای شروع تناظریابی، در ابتدا در تصاویر مختلف به صورت تقریبی نقاط متناظر توسط اپراتور انتخاب و به مرکز این نقاط پنجره‌ها ایجاد می‌شوند. در ادامه تناظریابی پنجره‌های جدید در تصویر اول، با پوشش سطح صورت به روش region growing ایجاد می‌گردند. برای بدست آوردن محل تقریبی پنجره‌های متناظر با پنجره تصویر اول در تصاویر دوم و سوم از پنجره‌های همسایه استفاده می‌شود. به این صورت محل تقریبی پنجره‌های متناظر با تقریب مناسب به صورت اتوماتیک محاسبه می‌شود. از دیدگاه سرشکنی $f(x,y)$ مشاهده، معادله ریاضی است و مجهولات این معادله ضرایب ترانسفورماسیون پروجکتیو^{۱۹} $X = \{a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, a_6, a_7, a_8\}$ هستند. برای همگرایی سریعتر و دقیقتر مسأله کمترین مربعات، تناظریابی با استفاده از روش LM [۱۸ و ۱۹] صورت گرفت که منجر به همگرایی دقیق‌تر و سریعتر نسبت به حل کمترین مربعات به روش Gauss-Newton [۱۷] گردید.

بازسازی

منظور از بازسازی سطح، محاسبه مختصات نقاط عکسی در سیستم مختصات شی (3D) است. رابطه اصلی تقاطع فضایی است (رابطه ۷) که با خطی نمودن رابطه (۱) نسبت به مجهولات (X, Y, Z) تشکیل می‌شود و برای انجام آن نیاز به محاسبه پارامترهای کالیبراسیون و توجیه خارجی دوربین است.

$$\begin{aligned} & \frac{L_1 D_3 - L_9 D_1}{D_3^2} dX + \frac{L_2 D_3 - L_{10} D_1}{D_3^2} dY \\ & + \frac{L_3 D_3 - L_{11} D_1}{D_3^2} dZ = x + \Delta x - x|_0 \\ & \frac{L_5 D_3 - L_9 D_2}{D_3^2} dX + \frac{L_6 D_3 - L_{10} D_2}{D_3^2} dY \\ & + \frac{L_7 D_3 - L_{11} D_2}{D_3^2} dZ = y + \Delta y - y|_0 \end{aligned} \quad (7)$$

که در آن،

$$\begin{aligned} D_1 &= L_1 X + L_2 Y + L_3 Z + L_4 \\ D_2 &= L_5 X + L_6 Y + L_7 Z + L_8 \\ D_3 &= L_9 X + L_{10} Y + L_{11} Z + 1 \end{aligned} \quad (8)$$

و $x|_0, y|_0$ مقادیر محاسباتی (x, y) طبق رابطه (۱) است.

با توجه به محاسبات توجیه خارجی و کالیبراسیون دوربین و مشخص بودن این پارامترها محاسبات تقاطع فضایی انجام گردید. نتیجه این محاسبات، بازسازی سطح صورت است که در شکل (۷) دیده می‌شود. متوسط دقت موقعیت سطح بازسازی شده توسط رابطه پخش خطاهای معادله (۷) برابر ۰/۷ میلی‌متر برآورد شده است.

نمایش

نمایش سطح سه بعدی صورت به سه روش انجام گردید:

- (۱) مثلث‌بندی نقاط نامنظم به روش دلونی^{۱۹}
- (۲) منحنی تراز سطح صورت
- (۳) نورپردازی سطح صورت^{۲۰}

شکل (۸) مدل‌سازی بر مبنای مثلث‌بندی نقاط سطح صورت را نشان می‌دهد. برای ترسیم منحنی میزان از

تناظریابی عارضه مبنا صورت پذیرد [۳]. روش adaptive پروفسور Gruen راه حلی برای مواجهه با این مشکل است. روش او بر مبنای تست‌های آماری و ارزیابی همبستگی پارامترها بوده است بطوریکه تنها پارامترهای مستقل وارد سرشکنی شوند [۲]. بکارگیری روش همبستگی نیاز به مقدار اولیه دقیق مجهولات دارد زیرا تست‌های آماری همبستگی، برای نواحی نزدیک به نقطه مینیمم تابع هدف صادقند. بنابراین چنین روشی بطور کامل اجرایی نمی‌باشد. در این تحقیق یک روش جدید برای انتخاب پارامترهای مستقل پیشنهاد و اجراء شده است. در این روش ضرایب ترانسفورماسیون (پارامترها) توسط معیار حساسیت (رابطه ۶) به طور اتوماتیک انتخاب شدند [۹].

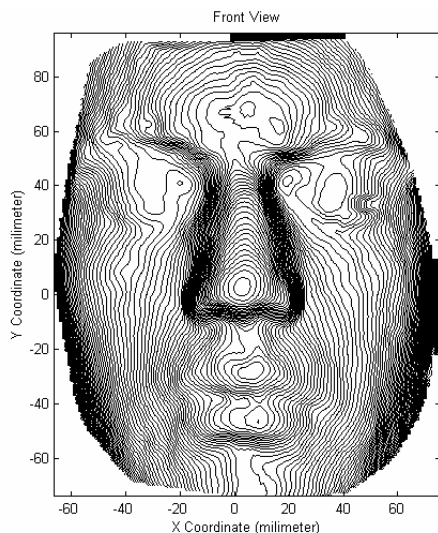
$$\delta_j = |\Delta S| \quad (6)$$

در رابطه بالا δ_j حساسیت پارامتر j است و ΔS ، تغییرات تابع هدف به ازای تغییرات کوچک پارامترها است. تابع هدف برای مسایل سرشکنی کمترین مربعات $S = V^T P V$ است که V مانده‌ها و P وزن مشاهدات است. پارامترهایی که δ آنها از δ_{\min} (حد آستانه) بزرگتر است بعنوان حساس‌ترین پارامترها در نظر گرفته شده و انتخاب می‌شوند. پارامترهایی که بطور عمده توانایی کاهش تابع هدف را ندارند به‌طور موقت از روند سرشکنی کنار گذاشته می‌شوند. این پارامترها زمانی وارد سرشکنی می‌شوند که توانایی کاهش تابع هدف را داشته باشند. در تناظریابی به این روش، بدون بکارگیری مقادیر اولیه دقیق حتی یک مورد تکینگی یا واگرایی بخاطر وابستگی پارامترها یا حساسیت نگاشت به ضرایب مخرج کسر دیده نشده است.

با استفاده از قانون پخش خطاها برای رابطه (۳-ب) دقت تناظریابی در فضای تصویر برابر ۰/۰۵ پیکسل (هر پیکسل ۲۱ میکرون) ارزیابی گردید. نتایج تناظریابی برای کل صورت انسان در جدول (۳) قرار گرفته است.

جدول ۳: نتایج محاسبات تناظریابی.

تعداد نقاط تناظریابی شده	۱۸۱۵۹
تعداد کل نقاط در فضای شیئی	۶۰۵۳
تناظریابی اشتباه (mismatch)	۰/۱۴ درصد
دقت تناظریابی در فضای تصویر	۰/۰۵ پیکسل

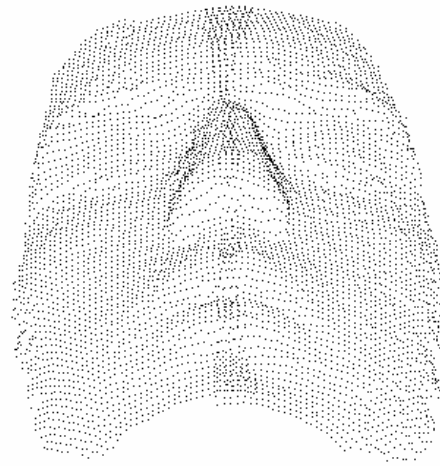


شکل ۹: نمایش منحنی میزان سطح صورت.

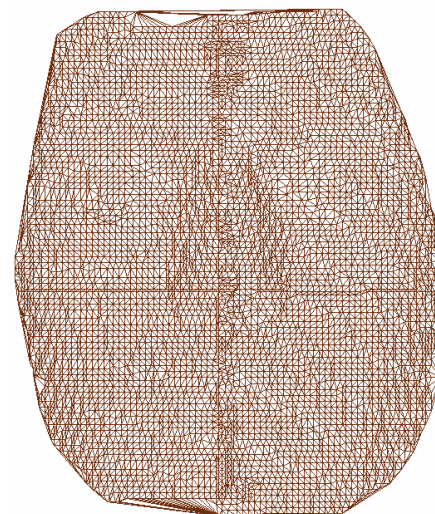


شکل ۱۰: نمایش نورپردازی شده سطح صورت.

شبکه نقاط منظم که به کمک درونیابی مدل مثلث بندی نقاط محاسبه شده است استفاده گردید. شکل (۹) منحنی میزان سطح صورت را نشان می دهد.



شکل ۷: نمایش روبروی صورت توسط نقاط در فضای شیء. این نقاط حاصل تقاطع فضایی نقاط متناظر در فضای شیء است.



شکل ۸: نمایش مثلث بندی نقاط سطح صورت. در این مثلث بندی برای ۶۰۵۳ نقطه، ۱۸۱۲۲ یال و ۱۲۰۷۰ مثلث.

نمایش کامل و سه بعدی سطح صورت در نرم افزار تخصصی کارهای متحرک سازی 3D Max نگارش 3.0 انجام گردید. شکل (۱۰) سطح نورپردازی شده صورت توسط این نرم افزار را نشان می دهد.

بحث

نتایج محاسبات بازسازی سطح صورت مطابق با اهداف طراحی شبکه فتوگرامتری برد کوتاه برای ایستگاههای عکسبرداری با دقت کمتر از ۱ میلیمتر با توجه به دقت شبکه نقاط کنترل که محاسبات کالیبراسیون و توجیه خارجی بر مبنای آن صورت گرفته است حاصل گردید. با این وجود در برخی نواحی سطح صورت مشکلاتی بوجود آمد. در اطراف پلک بخاطر لرزش پلک در زمان عکسبرداری تناظریابی اشتباه صورت گرفته است (شکل ۸ و ۹). این مشکل با کاهش زمان عکسبرداری رفع می شود. مشکل بعدی، کاهش دقت تناظریابی در نواحی گوشه های

- برای کارایی بیشتر این سیستم و بهبود دقت و اجرای آن پیشنهادهاتی به قرار زیر مطرح می‌شود:
- (۱) ایجاد شبکه کالیبراسیون دقیق‌تر برای افزایش دقت محاسبات کالیبراسیون و توجیه خارجی.
 - (۲) استفاده از روش تصویر الگو بر صورت توسط پروجکتور برای ایجاد بافت مصنوعی. بدن در نظر گرفتن محدودیت رنگ پوست این روش از لحاظ اجرایی سرعت بیشتری دارد.
 - (۳) استفاده از تارگت‌های کد شده برای نقاط کنترل و نقاط اولیه در تناظریابی که باعث افزایش دقت نشانه‌روی توسط روش‌های تناظریابی خواهد شد و روند قرائت را اتوماتیک می‌نماید.
 - (۴) استفاده از چند دوربین که منجر به کاهش زمان عکسبرداری خواهد شد.

تقدیر و تشکر

از آقای مهدی امیری پریان و خانم مهناز امیری پریان که با نگارنده در فاز جمع‌آوری اطلاعات همکاری نموده اند تشکر و سپاسگزاری می‌شود. همچنین از آقای دکتر فرهاد صمدزادگان برای پیشنهاد موضوع تحقیق قدردانی می‌شود.

صورت (نزدیک به گوش‌ها) بخاطر تیلت زیاد دوربین نسبت به سطح صورت است که این مشکل بخاطر محدودیت فضای کار ایجاد شده است. برای رفع این مشکل می‌توان محیطی مخصوص با در نظر گرفتن شرایط مناسب بر اساس طراحی شبکه فتوگرامتری برد کوتاه، بوجود آورد.

نتیجه‌گیری و پیشنهادات

یک سیستم بر مبنای روش فتوگرامتری رقومی برای اندازه‌گیری و محاسبه مدل سه بعدی سطح صورت اجراء و ارزیابی گردید. با توجه به دقت و زمان جمع‌آوری اطلاعات (عکسبرداری) این سیستم می‌تواند برای اهداف پزشکی مانند: جراحی فک و دندان، جمجه سر به صورت شبیه‌سازی و تخمین نتیجه عملیات جراحی بکار گرفته شود. علاوه بر موضوع صورت انسان این سیستم می‌تواند برای موضوعات دیگر که نیاز به سهولت اجراء و دقت بالا دارند مانند بررسی پیشرفت زخم‌های عفونی نیز بکار گرفته شود. در ضمن در کاربردهای متحرک‌سازی مدل ایجاد شده به سادگی قابل استفاده است.

مراجع

- 1 - Abdel-Aziz, Y. I. And Karara, H. M. (1971). "Direct linear transformation from comparator coordinates into object space coordinates in close range photogrammetry." *Proceedings of the ASP/UI Symposium on the Close-Range photogrammetry*, Urbana, Illinois (May), PP. 1-18.
- 2 - Atkinson, K. B. (1996). *Close range photogrammetry and machine vision*. Whittles Publishing.
- 3 - Calitz, M. F. and Ruther, H. (1996). "Least absolute deviation (LAD) image matching." *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing 51*, PP. 223-229.
- 4 - Chen, F. J. (1997). "Application of least-squares adjustment technique to geometric camera calibration and photogrammetric flow visualization." *ISA 43rd, International Instrumentation Symposium*, Orlando, Florida.
- 5 - CyberWare ; <http://www.headus.com.au/cyberware/>
- 6 - D'Apuzzo, N. (1997). "Automated measurement of human faces. First step: the face mask." *2nd ARIDA/SGPBF Workshop on Image sensing and its Application*, Zurich, Switzerland.
- 7 - D'Apuzzo, N. (1998). "Automated photogrammetric measurement of human faces." *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, Hakodate, Japan, Vol. 32 (B5), PP. 402-407.
- 8 - Faig, W. (1976). "Calibration of close-range photogrammetric systems: mathematical formulation." *XIII congress of the International Society for Photogrammetry, Helsinki, Commission V, Working Group V/1, Invited Paper*.

- 9 - Finsterle, S. (2000). *iTOUGH2 User's Guide*, Report LBNL-40040, Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkley, Calif.
- 10 - Fraser, C. S. (1984). "Network design considerations for non topographic photogrammetry." *Photogrammetry Engineering & Remote Sensing*, Vol. 50, No. 8, PP. 1115-1126.
- 11 - Fua, P. and Miccio, C. (1997). "Fitting sophisticated facial animation models to image data." *Optical 3D measurement Techniques IV*, PP. 3-10.
- 12 - Gabel, H. et al. (1996). "Photogrammetric quantification of changes of the soft tissue after skeletal treatment of the facial part of the skull." *International Archive of Photogrammetry and Remote sensing*, Vol. 31, No. B5, PP. 188-193.
- 13 - Gruen, A. (1980). "Precision and reliability aspects in close-range photogrammetry." *Photogrammetric Journal of Finland*, Vol. 8, No. 2, PP. 117-132.
- 14 - Gruen, A. and Baltsavias E. P. (1989). "Automatic 3D measurement of human faces with CCD-Cameras." *Proc. of SPIE*, Vol. 1030, PP. 106-116.
- 15 - Haralick, R. M. and Shapiro, L. G. (1993), *Computer and robot vision*, Addison-Wesley Publishing Company.
- 16 - Koch, R. M. et al. (1996). "Simulating facial surgery using finite element models." *SIGGRAPH 96 Proc. Conf.*, New Orleans.
- 17 - Leick, A. (1995). *GPS satellite surveying Second Edition*, John Wiley & Sons, Inc.
- 18 - Levenberg, K. (1944). "A method for the solution of certain nonlinear problems in least squares." *Quart. Appl. Math.*, Vol. 2, PP. 164-168.
- 19 - Marquardt, D. W. (1963). "An algorithm for least squares estimation of nonlinear parameters." *SIAM J. Appl. Math.*, Vol. 11 , PP. 431- 441.
- 20 - Maas, H. G. (1992). "Robust automatic surface reconstruction with structured light." *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol. 29, No. B5, PP. 709-713.
- 21 - Zhizhuo, W. (1990). *Principles of photogrammetry (with Remote sensing)*, Publishing House of Surveying and Mapping, Beijing.

واژه های کلیدی به ترتیب استفاده در متن

1 – Animation	2 – Finite Elements	3 – Laser Scan	4 – Coded Light
5 – Triangulation	6 – Field of View	7 – Depth of Field	8 – Incidence Angle
9 – Additional Parameters	10 – Ideal Camera	11 – Area Based	12 – Feature Based
13 – Pattern	14 – Least Squares	15 – Multi Image	16 – Adaptive
17 – Template	18 – Window	19 – Delaunay	20 - Rendering