

حسگرهای مبتنی بر اثر هال

امیرمهدی نامجو

دانشگاه صنعتی شریف، دانشکده مهندسی کامپیوتر

شماره دانشجویی: ۹۷۱۰۷۲۱۲

درس اندازه‌گیری و کنترل کامپیوتری

استاد گرامی: جناب آقای دکتر همتیار

آن‌ها، شاهد افزایش اقبال عمومی نسبت به آنان هستیم. از جمله این دلایل، می‌توان به موارد زیر اشاره کرد. [۱]

- (۱) طول عمر بیش‌تر
- (۲) نرخ پاسخگویی بالاتر
- (۳) قابلیت اطمینان^۱ بالاتر
- (۴) قابلیت اتکا بالاتر
- (۵) کارایی پیوسته و بیش‌تر (بدون استهلاک)
- (۶) مقاومت بیش‌تر نسبت به گرد و خاک

۱.۳. نمونه‌هایی از حسگرهای غیرتماسی

حسگرهای غیرتماسی، به شکل‌های مختلف و برای امورمختلفی ساخته شده‌اند. بعضی از انواع این حسگرها به شرح زیر است:

- (۱) LVDT: مبدل تفاضلی متغیر خطی یا LVDT، گونه‌ای از حسگرهای غیرتماسی است که کارکرد آن - همان‌طور که در درس اندازه‌گیری و کنترل کامپیوتری دیدیم - مبتنی بر جریان القایی، سیم‌پیچ‌های فلزی و هسته فلزی است. در LVDT ها از حداقل دو سیم‌پیچ فلزی استفاده می‌شود. [۱]
- (۲) RVDT: مبدل تفاضلی متغیر زاویه‌ای یا RVDT گونه‌ای دیگر از حسگرهای تماسی است که کارکردی شبیه LVDT دارد ولی مبنای حرکتی آن به صورت حرکت‌های چرخشی است. [۱]
- (۳) PIPS: این حسگرها که تکنولوژی انحصاری شرکت Positek هستند، کارکردی شبیه LVDT ها دارند ولی برخلاف LVDT ها، در این نوع حسگرها از یک سیم پیچ استفاده می‌شود. [۱]

چکیده - در این گزارش، به حسگرهای مبتنی بر اثر هال می‌پردازیم. این حسگرها، جزو حسگرهای غیرتماسی هستند. در ابتدا به طول خلاصه به حسگرهای غیرتماسی پرداخته و پس از تبیین کلی موضوع، به بررسی حسگرهای مبتنی بر اثر هال می‌پردازیم. در ابتدا به تشریح اثر هال و سپس نحوه استفاده از آن به عنوان حسگر و کاربردهای آن در قسمت‌های مختلف و همچنین مزایا و معایب استفاده از این حسگرها می‌پردازیم.

کلمات کلیدی - حسگرهای غیرتماسی - اثر هال - حسگرهای مبتنی بر اثر هال

۱. حسگرهای غیرتماسی

۱.۱. تعریف

حسگرهای غیرتماسی، گونه‌ای از حسگرها هستند که با فناوری‌های گوناگون، بدون نیاز به تماس مستقیم، مقدار مد نظر را اندازه‌گیری می‌کنند. در این نوع حسگرها اصطکاک و اجزای متحرک نقش اساسی ایفا نکرده و در نتیجه فرسودگی کاهش می‌یابد.

حسگرهای تماسی، در نقطه مقابل حسگرهای تماسی هستند. در حسگرهای تماسی نیاز به تماس مستقیم فیزیکی برای اندازه‌گیری متغیر مدنظر وجود دارد. این تماس می‌تواند از طریق جا به جایی یک پیستون، جابه‌جایی یک رسانا روی رسانای دیگر (نظیر پتانسیومتر) و موارد دیگر باشد؛ اما به هر حال اصل نیاز به جابه‌جایی و تماس مستقیم در ساختار خود حسگر نقش اساسی دارد. [۱]

۱.۲. دلایل عمومی استفاده از حسگرهای غیرتماسی

حسگرهای غیرتماسی، مزایای بالایی دارند که باعث شده امروزه با گسترش تکنولوژی و کاهش هزینه ساخت

¹ Reliability

(۴) حسگرهای فراصوتی: حسگرهای فراصوتی^۲ از امواج صوتی با فرکانس بالا برای کار استفاده می‌کنند. مثلاً برای تشخیص فاصله، موجی به سمت هدف فرستاده شده و از مدت زمانی که طول می‌کشد تا انعکاس این موج دوباره به حسگر برسد، برای بدست آوردن فاصله استفاده می‌شود. از این حسگرها عموماً برای اندازه‌گیری‌های فواصل طولانی استفاده می‌شود ولی امکان اندازه‌گیری فواصل کوتاه‌تر نظیر عمق یک مایع در مخزن هم به کمک آنان وجود دارد. [۲]

(۵) دماسنج‌های تابشی: هر جسمی با دمای بالاتر از صفر کلون، تابش‌های گرمای دارد که به کمک حسگرهای خاص، قابل اندازه‌گیری هستند. این حسگرها عموماً نقشه‌ای یک یا دوبعدی از توزیع دما در نقاط مختلف یک محیط را براساس تابش‌های دریافتی در اختیار کاربر قرار می‌دهند. یکی از رایج‌ترین کاربردهای آنان، در اندازه‌گیری دمای بدن انسان به شکل سریع است. [۲]

(۶) حسگرهای مبتنی بر جریان گردابی^۳: این حسگرها که از به نوعی مبتنی بر القای الکتریکی هستند، از طریق میدان‌های مغناطیسی ایجاد شده در اثر جریان متناوب و تغییر جهت این میدان‌های مغناطیسی و جریان القایی در اثر این تغییر جهت، موقعیت اجسام را تشخیص می‌دهند. این حسگرها معمولاً در ابعاد کوچک ساخته شده و برای کاربردهای مکانی ریزمقیاس‌تر نظیر تنظیم کردن ماشین‌ابزار، اندازه‌گیری لرزش اجسام و... استفاده می‌شود. [۳]

(۷) حسگرهای نوری فاصله‌ای: از تعدادی از حسگرهای نوری هم مشابه حسگرهای فراصوتی برای تشخیص فاصله یا جابه‌جایی از طریق اندازه‌گیری شدت و زمان نور بازتابی از سطوح مختلف استفاده می‌شود. البته گاهی اوقات نوع جنس سطوح و یکسری ویژگی‌های آن می‌تواند بر کارکرد این سنسورها اثرگذار باشد و در نتیجه باید

در زمینه استفاده از آنان مطالعه کافی داشت. [۲]

(۸) حسگرهای مبتنی بر اثر هال: این حسگرها با تکیه بر اثر هال که یک پدیده الکترومغناطیسی است و بر مبنای اختلاف ولتاژ ایجاد شده در اثر قرار گرفتن یک صفحه فلزی حامل جریان در میدان مغناطیسی، کار می‌کنند. این حسگرها را به طور مفصل‌تری در این گزارش بررسی می‌کنیم.

۲. اثر هال

اثر هال، پدیده‌ای الکترومغناطیسی است که اولین بار در سال ۱۸۷۹ میلادی توسط ادوین هال^۴، کشف و گزارش شد و از این رو به افتخار نام این دانشمند، این نام بر روی آن قرار گرفته است. [۴]

اثر هال مبتنی بر ذات جریان الکتریکی است. جریان الکتریکی از جا به جایی حاملان بار در یک رسانا اتفاق می‌افتد. این ذرات حامل بار، الکترون‌ها و یون‌ها هستند و البته در عمل، گاهی اوقات به جای الکترون، مفهوم جا به جایی حفره‌هایی با بار مثبت هم مطرح می‌شود. این ذرات بردار در صورتی که در حضور یک میدان مغناطیسی قرار بگیرند، تحت تاثیر نیروی لورنتز خواهند بود. در صورت نبود میدان مغناطیسی، این ذرات باردار در مسیری تقریباً مستقیم در رسانا که اندکی به دلیل ناخالصی‌ها ممکن است جا به جا شود، حرکت می‌کنند.

برای یک قطعه فلزی ساده که تنها الکترون‌ها در آن حرکت می‌کنند، می‌توان به راحتی از روی رابطه نیروی لورنتز، این پدیده را توجیه کرد. برای این منظور باید به شکل ۱ توجه کرد.

فرمول نیروی لورنتز به صورت

$$\mathbf{F} = q(\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B}) \quad (1)$$

است. [۵]

با فرض سرعت در راستای x و میدان مغناطیسی در راستای z می‌دانیم که عبارت $v_x B_z$ به صورت منفی ظاهر خواهد شد. در حالتی که نیروی وارده صفر باشد، رابطه

$$0 = E_y - v_x B_z \quad (2)$$

را خواهیم داشت. البته باید توجه داشت که عملاً به ازای الکترون‌ها، $v_x \rightarrow -v_x$ و $q \rightarrow -q$ است. E_y همان

⁴Edwin Hall

²Ultrasonic

³Eddy Current

حامل جریان را الکترون فرض کردیم، در روابط بدست آمده اثرگذار بود. در نتیجه اگر فرض کنیم جهت میدان مغناطیسی برعکس شود، اثر برعکس بر الکترون ها گذاشته و منجر به تغییر علامت ولتاژ القایی می شود و از این طریق، می توانیم در جهت میدان مغناطیسی نیز تمایز قائل شویم. [۴]

نکته حائز اهمیت دیگر این است که در عمل، بیش تر اوقات برای ورقه، از یک نیم رسانا استفاده می شود. دلیل این موضوع هم تاثیر گذاری همزمان الکترون ها و حفره ها در نیم رسانا است که باعث می شود ضرایب R_H بزرگ تری بدست آمده و آشکارسازی ولتاژ به شکل راحت تری صورت بگیرد. برای نیم رساناها می توان در یک تقریب نسبتا خوب، R_H را به صورت

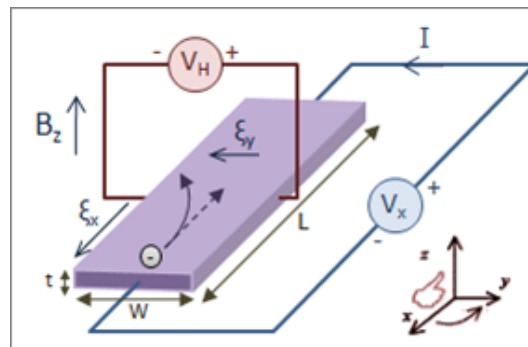
$$R_H = \frac{p\mu_h^2 - n\mu_e^2}{e(p\mu_h + n\mu_e)^2} \quad (۸)$$

بدست آورد که در آن، n ضریب تجمع الکترون ها، p ضریب تجمع حفره ها، μ_e تحرک پذیری الکتريکی الکترون ها و μ_h تحرک پذیری الکتريکی حفره ها و e بار الکترون است. البته در چنین مواردی، تحلیل نهایی تمامی روابط موجود به سادگی رابطه (۷) نیست اما آن رابطه می تواند دیدی سطح بالا و کلی از نحوه اثرگذاری پدیده هال به ما بدهد. [۴]

اگر بخواهیم به شکل شهودی و مستقل از روابط ریاضیاتی به اثر هال نگاه کنیم، می توانیم آن را این طور توجیه کنیم که در اثر قرار گرفتن در میدان مغناطیسی، الکترون ها به جای عبور یک نواخت از نوار رسانا (نیم رسانا)، در یک سمت آن تجمع بیش تری پیدا کرده و در نتیجه آن حفره های مثبت در سمت دیگر تجمع خواهند کرد و به همین دلیل، اختلاف ولتاژ بین دو قسمت رسانا (نیم رسانا) ایجاد خواهد شد.

۳. شیوهی پیشنهادی

در شیوهی پیشنهادی برای وضوح برتر توسط نگارندگان در [۷]، هر یک از تصاویر با وضوح بالا، به عنوان تصویر آموزشی، متناظر با قسمتی از تصویر با وضوح پایین هستند. تصاویر آموزشی می توانند تفاوت هایی با تصویر اصلی از نقطه نظر شدت روشنایی یا زاویه ی اخذ داشته باشند. این تفاوت ها می تواند ناشی از برداشت عکسها در



شکل ۱: نمودار کلی اثر هال [۴]

میدان الکتريکی القایی است که منجر به ایجاد ولتاژ القایی اثر هال می شود. در نتیجه از آن جایی که $E_y = \frac{-V_H}{w}$ در نتیجه با جایگزینی در عبارت (۲) به رابطه

$$V_H = v_x B_z w \quad (۳)$$

می رسیم.

با این وجود جریان قراردادی که عملا جریان حفره های حامل بار مثبت است، در خلاف جهت جریان الکترون ها و با بار منفی است، در نتیجه می توانیم برای جریان به رابطه

$$I_x = ntw(-v_x)(-e) \quad (۴)$$

برسیم که در آن n چگالی تعداد حاملین بار با واحد m^{-3} است و tw هم سطح مقطع عبوری را مشخص می کند. با حل معادله بر حسب w و جایگذاری آن در (۳) داریم [۴]:

$$V_H = \frac{I_x B_z}{nte}. \quad (۵)$$

البته رایج است که در این رابطه ضریبی تحت نام ضریب هال به صورت

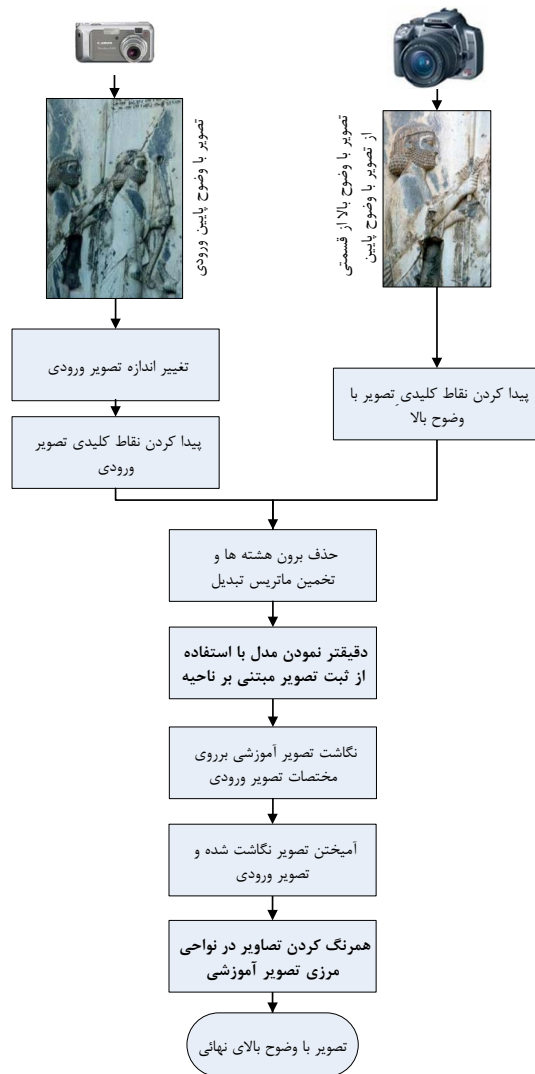
$$R_H = \frac{1}{ne} \quad (۶)$$

با واحد m^3/C یا $\Omega cm/G$ تعریف کنند و رابطه نهایی به صورت

$$V_H = R_H \left(\frac{IB}{t} \right) \quad (۷)$$

نمایش داده می شود. در نتیجه عوامل اصلی در تعیین ولتاژ، شدت جریان، ضخامت ورقه و میدان مغناطیسی است. [۶]

نکته مهمی که در این روابط وجود دارد، این است که عملا جنس ذره حامل بار در آن اثر دارد. یعنی این که



شکل ۲: چارچوب کلی شیوهی پیشنهادی.

زمانهای متفاوت و یا با دوربینهای متفاوت و از زوایای مختلف باشد. در این شیوه ابتدا تصویر با وضوح پایین به اندازهی مطلوب بزرگ شده و سپس تبدیل مناسبی برای نگاشت هر یک از تصاویر آموزشی بر روی تصویر مورد نظر با استفاده از نقاط کلیدی SIFT^۵ و الگوریتم RANSAC^۶ در قالب ماتریس هوموگرافی پیدا می‌شود. در انتها تصویر با وضوح بالای نگاشت شده، با تصویر با وضوح پایین ورودی ترکیب می‌شود. چارچوب کلی کار در این مقاله در شکل ۲ آمده است. دو مرحلهی «دقیق‌تر نمودن مدل با استفاده از ثبت تصویر مبتنی بر ناحیه» و «همرنگ نمودن تصاویر در نواحی مرزی» در این مقاله اضافه شده‌اند. از آنجا که ذکر روش کار برای یک یا چند تصویر آموزشی تفاوتی ندارد، در اینجا فرض بر آن است که فقط از یک تصویر آموزشی استفاده می‌شود.

مهمترین قسمت در کار حاضر استفاده از معیار مقایسه‌ی ساختاری دو تصویر (SSIM) برای بهبود شیوهی ثبت تصویر لوکاس-کاناد [۸] می‌باشد. در مراجع از فرمولبندی‌های متفاوتی برای بیان این شیوه استفاده شده است. در این مقاله از فرمولبندی ذکر شده در [۹] استفاده خواهیم نمود و لذا مروری بر این فرمولبندی ضروری می‌باشد که در ادامه ذکر خواهد شد. پس از آن نگاهی بر معیار مقایسه‌ی SSIM داشته و سپس روش پیشنهادی بر اساس آنها بیان خواهد شد.

۳.۱. الگوریتم لوکاس-کاناد

هدف در شیوهی ثبت تصویر لوکاس-کاناد [۸] کمینه‌سازی مجموع مربع تفاضلات زیر بین تصویر آموزشی $T(x)$ و نگاشت تصویر ورودی $I(x)$ است:

$$SSD = \sum_x [I(W(x; p)) - T(x)]^2 \quad (9)$$

که در آن $W(x; p)$ بیانگر مدل تبدیل (در اینجا پروجکتیو)، $p = (p_1, \dots, p_8)^T$ پارامترهای مدل تبدیل، $I(W(x; p))$ نگاشت تصویر ورودی I بر روی مختصات تصویر آموزشی T و $x = (x, y)^T$ مختصات یک پیکسل می‌باشد. کمینه‌سازی (۹) نسبت به p انجام می‌شود. در شیوهی لوکاس-کاناد فرض بر آن است که در ابتدا تخمینی از مدل در دست بوده و در یک فرآیند تکراری این

تخمین بهبود داده می‌شود؛ در هر دور ابتدا عبارت زیر بر اساس Δp کمینه شده:

$$\sum_x [I(W(x; p + \Delta p)) - T(x)]^2 \quad (10)$$

و سپس پارامترها بروزرسانی می‌شوند:

$$p \leftarrow p + \Delta p \quad (11)$$

دو مرحلهی فوق تا مادامیکه الگوریتم همگرا نشده است تکرار خواهند شد. در فرآیند کمینه‌سازی، Δp به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\Delta p = H^{-1} \sum_x [\nabla I \frac{\partial W}{\partial p}]^T [T(x) - I(W(x; p))] \quad (12)$$

^۵ Scale Invariant Feature Transform (SIFT)

^۶ RANdom SAMple Consensus (RANSAC)

$MSSIM(X, Y)$ به نحوی تعریف شده است که هر چه دو تصویر به هم شبیه‌تر باشند این معیار به ۱ نزدیک‌تر خواهد بود. اما ما در اینجا به معیاری نیاز داریم که میزان تفاوت دو تصویر را نشان دهد. به این منظور از SSIM- استفاده نموده و آنرا SDIS^{۱۰} می‌نامیم:

$$SDIS(x, y) = -SSIM(x, y) \quad (۱۶)$$

بر اساس این تعریف، تفاوت بیشتر دو تصویر مقدار بزرگتری از SDIS را نتیجه خواهد داد. SSIM بین پیکسل‌های متناظر دو تصویر تعریف می‌شود؛ تصویری که از مقایسه‌ی شباهت تک تک پیکسل‌های دو تصویر با این معیار حاصل می‌شود در [۱۱]، SSIM map image نامیده شده است، به صورت متناظر در اینجا تصویری را که از مقایسه‌ی تفاوت دو تصویر بر اساس (۱۶) ایجاد می‌شود SDIS map image می‌نامیم. از آنجا که در ادامه از این معیار به عنوان میزان خطا در ثبت تصویر استفاده خواهیم کرد آنرا با E_{SDIS} نشان می‌دهیم. با در نظر گرفتن این معیار به عنوان ضریبی از میانگین مربعات خطا، رابطه‌ی (۹) به صورت زیر در خواهد آمد:

$$\sum_x E_{SDIS} \cdot [I(W(x; p)) - T(x)]^2 \quad (۱۷)$$

که در آن منظور از نقطه، ضرب عناصر نظیر در دو ماتریس است. برای کمینه‌سازی (۱۷)، با یک شیوه‌ی تکراری مشابه (۱۰) بایستی تابع زیر را کمینه نماییم:

$$\sum_x E_{SDIS} \cdot [I(W(x; p + \Delta p)) - T(x)]^2 \quad (۱۸)$$

که در آن E_{SDIS} در $W(x; p)$ ارزیابی می‌شود. با انجام بسط تیلور مرتبه‌ی اول روی $I(W(x; p + \Delta p))$ داریم:

$$SSD = \sum_x E_{SDIS} \cdot [I(W(x; p)) + \nabla I \frac{\partial W}{\partial p} \Delta p - T(x)]^2 \quad (۱۹)$$

که در آن: $\nabla I = (\frac{\partial I}{\partial x}, \frac{\partial I}{\partial y})$ گرادیان تصویر I ، ارزیابی شده در $W(x; p)$ و $\frac{\partial W}{\partial p}$ ژاکوبین مدل تبدیل می‌باشد.

از ادامه مطلب صرف نظر می‌کنیم.

الگوریتم ۱ الگوریتم ثبت تصویر لوکاس-کاناد مبتنی بر بهینه‌سازی گوس-نیوتون (LK-GN).

Input: The reference image I and template image T .

Output: Reg. parameters $p = (p_1, \dots, p_n)^T$ as the warp model $W(x; p)$.

- 1: **repeat**
- 2: Warp I with $W(x; p)$ to compute $I(W(x; p))$.
- 3: Compute the error image $T(x) - I(W(x; p))$.
- 4: Warp the gradient ∇I with $W(x; p)$.
- 5: Evaluate the Jacobian $\frac{\partial W}{\partial p}$ at $(x; p)$.
- 6: Compute the steepest descent images $\nabla I \frac{\partial W}{\partial p}$.
- 7: Compute the Hessian matrix using Equation (13).
- 8: Compute $[\nabla I \frac{\partial W}{\partial p}]^T$ and $[T(x) - I(W(x; p))]$.
- 9: Compute Δp using Equation (12)
- 10: Update the parameters $p \leftarrow p + \Delta p$
- 11: **until** $\|\Delta p\| \leq \epsilon$ or Reaching to Maximum Iteration allowed

که در آن H ، ماتریس هسین تقریبی^۷، به صورت زیر بدست می‌آید:

$$H = \sum_x [\nabla I \frac{\partial W}{\partial p}]^T [\nabla I \frac{\partial W}{\partial p}] \quad (۱۳)$$

این مراحل در الگوریتم ۱ نشان داده شده است [۹]. گونه‌های مختلفی از این الگوریتم پیشنهاد شده‌اند. سلزکی^۸ در [۱۰] از روش بهینه‌سازی لئونبرگ-مارکورت برای قسمت بهینه‌سازی آن استفاده نموده است که اساس کار ما در بخش‌های آتی می‌باشد.

۳.۲. ارزیابی خطا با محک SSIM

در [۱۱] محک MSSIM^۹ برای اندازه‌گیری کیفیت یک تصویر، به صورت زیر تعریف شده است:

$$MSSIM(X, Y) = \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M SSIM(x_j, y_j) \quad (۱۴)$$

که در آن X تصویر مرجع، Y تصویر تخریب شده؛ x_j و y_j اجزاء j امین پنجره در تصاویر و M ، تعداد پنجره‌ها می‌باشد. $SSIM(x, y)$ مطابق زیر تعریف می‌شود:

$$SSIM(x, y) = \frac{(\gamma \mu_x \mu_y + C_1)(\gamma \sigma_{xy} + C_2)}{(\mu_x^2 + \mu_y^2 + C_1)(\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + C_2)} \quad (۱۵)$$

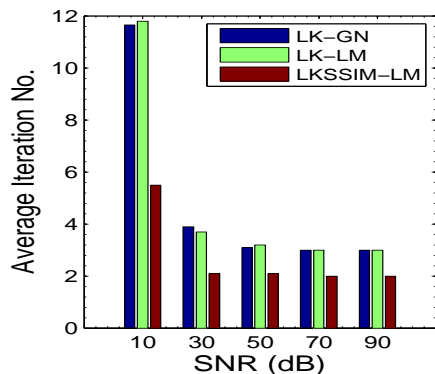
که در آن C_1, C_2 ثوابتی برای پایداری و $\mu_x, \sigma_x, \sigma_{xy}$ تخمین آمارگان محلی تصویر هستند که در [۱۱] تعریف شده‌اند.

⁷Approximate Hessian Matrix

⁸Szeliski

⁹Mean Structural SIMilarity

¹⁰Structural DISSimilarity



شکل ۴: میانگین تعداد تکرار مورد نیاز تا همگرایی.

آغازین بهینه‌سازی در هر سه الگوریتم، تخمین ماتریس تبدیل بدست آمده در مرحله‌ی قبل با استفاده از الگوریتم RANSAC می‌باشد. ماهیت تصادفی الگوریتم RANSAC موجب می‌شود که در هر اجرا تخمینی متفاوت با اجرای دیگر داشته باشیم. لذا هر آزمایش را می‌توان جدا از دیگری دانست.

۴.۱. نتایج مقایسه‌ای ثبت تصویر

هر سه شیوه‌ی فوق‌الذکر برای تصاویر شکل ۳ و در نرخ سیگنال به نویز^{۱۲} برابر با ۱۰، ۳۰، ۵۰، ۷۰ و ۹۰ dB از تصویر با وضوح پایین اجرا شده‌اند. هر الگوریتم در هر SNR ۲۰ مرتبه اجرا شده است.

شکل ۴ میانگین تعداد تکرارها تا همگرا شدن را برای هر سه روش فوق و در مقادیر مختلف نویز نشان می‌دهد. در هیچ یک از آزمایشات روی این تصاویر، روش LK واگرا نشده بود.

۴.۲. کاربرد در وضوح برتر

کیفیت بصری تصویر نهائی تولید شده، لازمه‌ی اعتبارسنجی هر الگوریتم وضوح برتر است. شکل ۳(ج) نتیجه‌ی نهائی افزایش وضوح تصویر ۳(آ) با استفاده از تصویر آموزشی ۳(ب) را نشان می‌دهد. ضریب بزرگ‌نمایی، ۲ در نظر گرفته شده است. برای مقایسه چند شیوه‌ی دیگر پیاده‌سازی شده‌اند. مقایسه‌ی تصاویر شکل ۵ کیفیت برتر شیوه‌ی پیشنهادی را به خوبی نشان می‌دهد. به عنوان روش آمیختن در روش پیشنهادی در این مقاله و روش ارائه



(آ) تصویر با وضوح پایین آموزشی با ورودی (ب) تصویر با وضوح بالا (ج) نتیجه نهائی در SNR=90dB

شکل ۳: نتیجه نهائی افزایش وضوح تصویر ورودی (ا) با استفاده از تصویر (ب) و با روش پیشنهادی در شکل ۲ که دقیق‌تر نمودن ثبت تصویر در آن با الگوریتم ۲ و هم‌رنگ نمودن بدون درز با شیوه‌ی ارائه شده در [۱۲] انجام شده است.

۴. نتایج پیاده‌سازی

شیوه‌ی پیشنهادی با شیوه‌ی اصلی لوکاس-کاناد [۸] در الگوریتم ۱ (LK-GN) و شیوه‌ی لوکاس-کاناد با روش بهینه‌سازی لونبرگ-مارکورت [۱۰] (LK-LM)، از نظر میانگین تعداد تکرار تا همگرایی و میانگین خطا (RMS^{۱۱}) و در مقادیر مختلف نویز مقایسه شده است. تصاویر مورد استفاده در شکل‌های ۳(آ) و ۳(ب) نشان داده شده‌اند. این تصاویر از یکی از سی‌دی‌های مربوط به نقش برجسته‌ی داریوش در بیستون اخذ شده‌اند. همانگونه که در شکل ۳ مشاهده می‌شود دو تصویر از نظر وضوح، شدت روشنایی و رنگ‌بندی با یکدیگر متفاوت هستند. تفاوت زاویه‌ی اخذ دو تصویر نیز در هنگام نگاشت پروجکتیو تصویر ۳(ب) بر روی تصویر ۳(آ) - که در اینجا نشان داده نشده است - مشخص می‌باشد.

هدف اصلی بالابردن وضوح قسمت متناظر با تصویر ۳(ب) در تصویر ۳(آ) با شیوه‌ی نشان داده شده در شکل ۲ است. در مقایسات انجام شده، تمام مراحل شکل ۲ به استثنای مرحله‌ی «دقیق‌تر نمودن مدل با استفاده از ثبت تصویر مبتنی بر ناحیه» یکسان بوده است. نقطه‌ی

^{۱۲}Signal to Noise Ratio (SNR)

^{۱۱}Root Mean Square



(ب) روش بزرگنمایی Bicubic



(آ) روش بزرگنمایی Replication



(د) روش ارائه شده در [۷]



(ج) روش ارائه شده در [۱۳]



(و) روش پیشنهادی در این مقاله



(ه) روش پیشنهادی در این مقاله بدون مرحله آمیختن با تبدیل موجک

شده در [۷] از تبدیل موجک دوبیشزو با ۳ سطح استفاده شده است. روش مبتنی بر مثال ارائه شده در [۱۳] نیز به منظور مقایسه پیاده‌سازی شده و برای حفظ سازگاری بلوکهای مجاور از شیوهی پوشش سطر به سطر ذکر شده در همان مرجع استفاده شده است. روشهای افزایش اندازهی تصویر Replication و Bicubic در واقع جزو روشهای افزایش وضوح به حساب نمی‌آیند و نتایج آنها صرفاً برای مقایسه آمده است. ناپدید شدن درز در نواحی مرزی و دقیق‌تر بودن نگاشت در شیوهی پیشنهادی مشخص است.

۵. جمع‌بندی

نویسندگان در [۷] شیوه‌ای جدید برای افزایش وضوح یک تصویر با استفاده از یک تصویر آموزشی ارائه نموده بودند که در مقاله‌ی حاضر به رفع مشکلاتی از آن پرداخته شد. استفاده از یک روش ثبت تصویر مبتنی بر ناحیه به منظور دقیق‌تر شدن مدل نگاشت تصاویر و حذف مرزهای تصاویر با یک روش هم‌رنگ‌سازی بدون درز مرحله‌ی هستند که در کار قبلی انجام نشده بودند. نوآوری اصلی این مقاله لحاظ کردن معیار شباهت ساختاری دو تصویر در فرمول‌بندی شیوهی معروف ثبت تصویر لوکاس-کاناد و استفاده از آن در وضوح برتر می‌باشد. نتایج پیاده‌سازی‌های انجام شده برتری شیوهی ثبت تصویر پیشنهادی و همچنین کارایی آنرا در مسأله‌ی وضوح برتر در مقایسه با برخی از دیگر روشها نشان داده است.

سپاس‌گزاری

مؤلفین وظیفه‌ی خود می‌دانند که از آقای دکتر Peter Kovese بابت توابع سودمند MATLAB و آقایان وفا خلیقی، مصطفی واحدی و دکتر مهدی امیدعلی بابت زحمات و راهنمایی‌های ارزنده‌ی آنها در زمینه‌ی زی‌پرشین^{۱۳} (که این مقاله با آن آماده شده است) تشکر به عمل آورند.

مراجع

- [1] Varriohm, "Non contact sensors," Mar 2020.
- [2] E. Edwards, "Types of noncontact sensors and their applications," 2017.
- [3] I. Ixthus, "What is an Eddy Current Sensor," publisher: Ixthus Instrumentation.
- [4] "Hall effect," May 2021. Page Version ID: 1025727292.
- [5] D. Halliday, J. Walker, and R. Resnick. *Fundamentals of Physics*. Halliday & Resnick Fundamentals of Physics, Wiley, 2010.
- [6] "Hall Effect," 2013.
- [7] M. Amintoosi, M. Fathy, and N. Mozayani, "Reconstruction+synthesis: A hybrid method for multi-frame super-resolution," in *(MVIP08) 2008 Iranian Conference on Machine Vision and Image Processing*, (University of Tabriz, Iran), pp.179–184, Nov. 4-7 2008.
- [8] B. Lucas and T. Kanade, "An iterative image registration technique with an application to stereo vision," in *IJCAI81*, pp.674–679, 1981.
- [9] S. Baker, R. Gross, and I. Matthews, "Lucas-kanade 20 years on: A unifying framework," *International Journal of Computer Vision*, vol.56, pp.221–255, 2004.
- [10] R. Szeliski, "Video mosaics for virtual environments," *IEEE Com-*

^{۱۳} زی‌پرشین با لوگوی X_εPersian بسته‌ی حروف‌چینی رایگان فارسی مبتنی بر L^AT_EX 2_ε و تحت سیستم‌عامل‌های ویندوز، لینوکس و مک می‌باشد: <http://www.parsilatex.com/>

puter Graphics and Applications, vol.16, pp.22–30, March 1996.

- [11] Z. Wang, A. Bovik, H. Sheikh, and E. Simoncelli, “Image quality assessment: From error visibility to structural similarity,” *IEEE Trans. Image Processing*, vol.13, pp.600–612, April 2004.
- [12] P. J. Burt and E. H. Adelson, “A multiresolution spline with application to image mosaics,” *ACM Trans. Graph.*, vol.2, no.4, pp.217–236, 1983.
- [13] W. T. Freeman, T. R. Jones, and E. C. Pasztor, “Example-based super-resolution,” *IEEE Comput. Graph. Appl.*, vol.22, no.2, pp.56–65, 2002.