

# 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<sup>۱</sup> 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

<sup>1</sup> Reliability

(۴) حسگرهای فراصوتی: حسگرهای فراصوتی<sup>۲</sup> 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<sup>۳</sup>: 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<sup>۴</sup>، 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

<sup>4</sup>Edwin Hall

<sup>2</sup>Ultrasonic

<sup>3</sup>Eddy 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

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

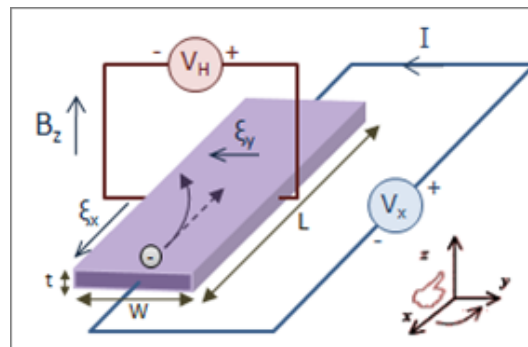
بدست آورد که در آن،  $n$  ضریب تجمع الکترون ها،  $p$  ضریب تجمع حفره ها،  $\mu_e$  تحرک پذیری الکتريکی الکترون ها و  $\mu_h$  تحرک پذیری الکتريکی حفره ها و  $e$  بار الکترون است. البته در چنین مواردی، تحلیل نهایی تمامی روابط موجود به سادگی رابطه (۷) نیست اما آن رابطه می تواند دیدی سطح بالا و کلی از نحوه 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. حسگرهای مبتنی بر اثر هال

#### ۳.۱. نحوه ساخت و طراحی مدار

نحوه کار کلی حسگرهای مبتنی بر اثر هال، اساسا براساس تئوری توضیح داده شده در قسمت قبل است. عموما حسگرهای مبتنی بر اثر هال، از ورقه نازک مستطیلی شکلی از جنس نیم رسانا نوع P نظیر گالیم آرسنید (GaAs)، ایندیم آنتیموان (InSb) و یا ایندیم آرسنید



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 برحسب  $w$  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

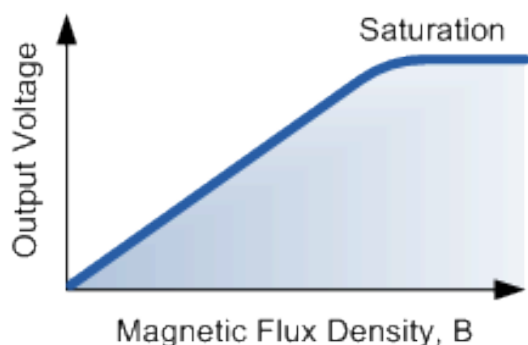
$$R_H = \frac{1}{ne} \quad (۶)$$

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



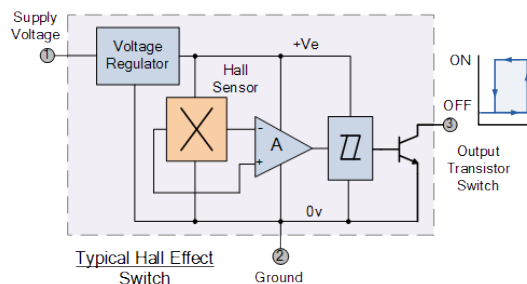
شکل ۳: نمودار خروجی ولتاژ حسگر آنالوگ نسبت به چگالی شار مغناطیسی عبوری. بعد از مقداری به بعد، به دلیل محدودیت تغذیه کننده تقویت کننده عملیاتی، ولتاژ به حالت اشباع می‌رسد. [۶]

این میدان، امکان قطع و وصل خروجی نهایی وجود دارد. نکته دیگری که وجود دارد این است که عموماً خروجی جریان خیلی زیاد نبوده و در حدود ۱۰ تا ۲۰ میلی آمپر است. در نتیجه اگر لود مدار بالا باشد، یک حسگر معمولی شاید نتواند چندان خوب عمل کند و برای رفع این مشکل در مدارهایی که لود مقابل خروجی بزرگ است، یک ترانزیستور NPN به صورت Open-Collector به خروجی مدار اضافه می‌شود. [۶]

### ۳.۲. نحوه کارکرد و کاربردها

از حسگرهای مبتنی بر اثر هال، در بسیاری از مواقعی که نیاز به اندازه‌گیری نوعی حرکت و جابه‌جایی بدون برخورد مستقیم است، استفاده می‌شود. این حرکت و جابه‌جایی هم می‌تواند به صورت مستقیم رو به حسگر بوده و هم در جهت طرفین باشد. عموماً جسمی که قرار است حرکت آن اندازه‌گیری شود، ماهیتی فلزی داشته و با متصل کردن آهنربا به آن، خاصیت مغناطیسی در آن ایجاد می‌شود تا در اثر این میدان مغناطیسی، ولتاژی در حسگر مبتنی بر اثر هال ایجاد بشود.

۳.۲.۱) شناسایی حرکت رو به حسگر: حرکت رو به حسگر یا Head-on همان طور که مشخص است، نشان دهنده نزدیک یا دور شدن یک میدان مغناطیسی در جهت عمود بر حسگر است. در اثر دور یا نزدیک شدن یک جسم که خاصیتی مغناطیسی دارد، میدان و شار مغناطیسی گذرا از حسگر دچار تغییر شده و به همین دلیل، ولتاژهای



شکل ۲: شمای کلی مدار اشمیت تریگر استفاده کننده از حسگر اثر هال. حسگر اثر هال با نماد مربعی که وسط آن ضربدر قرار دارد نمایش داده شده است. [۶]

(InAs) ساخته می‌شود که یک جریان به طور پیوسته در حال عبور از آن است. بر اثر تأثیرات مغناطیسی متغیر موردن اندازه‌گیری، اختلاف ولتاژی در دو سر این ورقه ایجاد می‌شود که به اندازه‌گیری این اختلاف ولتاژ و علامت آن، می‌توان به شدت این میدان مغناطیسی و همچنین جهت آن پی برد.

از خروجی این نوع حسگرها هم در سیستم‌های خطی آنالوگ و هم در سیستم‌های دیجیتال استفاده می‌شود. از آن جایی که عموماً مقدار ولتاژ القایی بسیار کوچک و در حد میکروولت است، نیاز به تقویت کننده وجود دارد. در سیستم‌های آنالوگ، خروجی مستقیماً وارد یک تقویت کننده عملیاتی شده و پس از آن به عنوان خروجی داده می‌شود. در سیستم‌های دیجیتال این خروجی ممکن است وارد یک مبدل آنالوگ به دیجیتال شده و یا این که در بعضی سیستم‌ها که حالت روشن و خاموش دارند، وارد یک مقایسه‌گر اشمیت تریگر<sup>۵</sup> بشود. برای درک بهتر به شکل‌های ۲ و ۳ توجه کنید.

دو نوع کلی سنسور دیجیتال مبتنی بر اثر هال وجود دارد. دوقطبی و تک قطبی. در انواع دو قطبی، برای رفتن به حالت فعال نیاز به یک قطع مغناطیسی و برای رفتن به حالت غیرفعال نیاز به یک قطب مغناطیسی دیگر است. به بیان دیگر حدود مقایسه‌گر اشمیت تریگر طوری تنظیم شده است که تنها با خروج از ناحیه میدان مغناطیسی، به حالت قبل بر نمی‌گردد. در نوع تک قطبی، تنها حضور یک قطب مغناطیسی برای فعال شدن و غیرفعال شدن کافیست و صرفاً براساس خروج یا ورود به

<sup>۵</sup>Schmidt Trigger (Hysteresis) Comparator

**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  $\mathbf{p} = (p_1, \dots, p_n)^T$  as the warp model  $\mathbf{W}(\mathbf{x}; \mathbf{p})$ .

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

$$\mathbf{p} \leftarrow \mathbf{p} + \Delta \mathbf{p} \quad (11)$$

دو مرحله‌ی فوق تا مادامیکه الگوریتم همگرا نشده است تکرار خواهند شد. در فرآیند کمینه‌سازی،  $\Delta \mathbf{p}$  به صورت زیر محاسبه می‌شود:

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

که در آن  $H$ ، ماتریس هسین تقریبی<sup>۶</sup>، به صورت زیر بدست می‌آید:

$$H = \sum_x [\nabla I \frac{\partial \mathbf{W}}{\partial \mathbf{p}}]^T [\nabla I \frac{\partial \mathbf{W}}{\partial \mathbf{p}}] \quad (13)$$

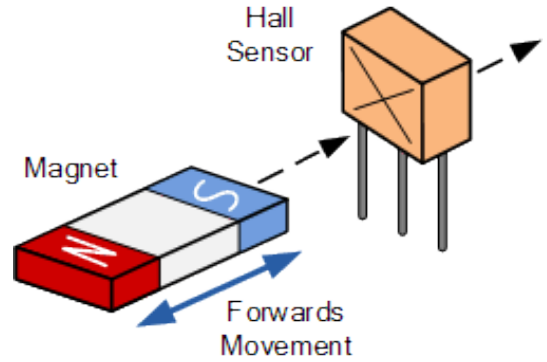
این مراحل در الگوریتم ۱ نشان داده شده است [۹]. گونه‌های مختلفی از این الگوریتم پیشنهاد شده‌اند. سلزکی<sup>۷</sup> در [۱۰] از روش بهینه‌سازی لونبرگ-مارکورت برای قسمت بهینه‌سازی آن استفاده نموده است که اساس کار ما در بخش‌های آتی می‌باشد.

### ۳.۴. ارزیابی خطا با محک SSIM

در [۱۱] محک MSSIM<sup>۸</sup> برای اندازه‌گیری کیفیت یک تصویر، به صورت زیر تعریف شده است:

$$\text{MSSIM}(X, Y) = \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M \text{SSIM}(x_j, y_j) \quad (14)$$

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



شکل ۴: حرکت رو به حسگر (Head-On). [۶]

متفاوتی به عنوان خروجی داده می‌شوند که می‌توان از مقدار آن برای بدست آوردن فاصله جسم تا حسگر استفاده کرد.

از آن جایی که میدا مغناطیسی در نقطه‌ای مشخص با فاصله از منبع میدان نسبت عکس مجذوری دارد، عموماً مدارهایی که خروجی حسگر را تحلیل می‌کنند و مثلاً منجر به تغییر وضعیت یک چراغ و ورود آن به وضعیت روشن یا خاموش می‌شوند، ساختار غیرخطی دارند. برای درک بهتر این نوع کاربرد به شکل ۴ توجه کنید.

### ۳.۳. 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:

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

که در آن  $\mathbf{W}(\mathbf{x}; \mathbf{p})$  بیانگر مدل تبدیل (در اینجا پروجکتیو)،  $\mathbf{p} = (p_1, \dots, p_8)^T$  پارامترهای مدل تبدیل،  $I(\mathbf{W}(\mathbf{x}; \mathbf{p}))$  نگاشت تصویر ورودی  $I$  بر روی مختصات تصویر آموزشی  $T$  و  $\mathbf{x} = (x, y)^T$  مختصات یک پیکسل می‌باشد. کمینه‌سازی (۹) نسبت به  $\mathbf{p}$  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  $\Delta \mathbf{p}$  کمینه شده:

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

و سپس پارامترها بروزرسانی می‌شوند:

<sup>۶</sup> Approximate Hessian Matrix

<sup>۷</sup> Szeliski

<sup>۸</sup> Mean Structural SIMilarity



شکل ۵: نتیجه نهایی افزایش وضوح تصویر ورودی (ا) با استفاده از تصویر (ب) و با روش پیشنهادی در شکل؟؟ که دقیق تر نمودن ثبت تصویر در آن با الگوریتم ۲ و همرنگ نمودن بدون درز با شیوهی ارائه شده در [۱۲] انجام شده است.

که در آن:  $\nabla I = (\frac{\partial I}{\partial x}, \frac{\partial I}{\partial y})$  گرادیان تصویر  $I$ ، ارزیابی شده در  $\mathbf{W}(\mathbf{x}; \mathbf{p})$  و  $\frac{\partial \mathbf{W}}{\partial \mathbf{p}}$  ژاکوبین مدل تبدیل می باشد. از ادامه مطلب صرف نظر می کنیم.

#### ۴. نتایج پیاده سازی

شیوهی پیشنهادی با شیوهی اصلی لوکاس-کاناد [۸] در الگوریتم ۱ (LK-GN) و شیوهی لوکاس-کاناد با روش بهینه سازی لونبرگ-مارکورت [۱۰] (LK-LM)، از نظر میانگین تعداد تکرار تا همگرایی و میانگین خطا ( $RMS^{10}$ ) و در مقادیر مختلف نویز مقایسه شده است. تصاویر مورد استفاده در شکل های ۵ (ا) و ۵ (ب) نشان داده شده اند. این تصاویر از یکی از سی دی های مربوط به نقش برجسته ی داریوش در بیستون اخذ شده اند. همانگونه که در شکل ۵ مشاهده می شود دو تصویر از نظر وضوح، شدت روشنایی و رنگ بندی با یکدیگر متفاوت هستند. تفاوت زاویه ی اخذ دو تصویر نیز در هنگام نگاشت پروجکتیو تصویر ۵ (ب) بر روی تصویر ۵ (ا) - که در اینجا نشان داده نشده است - مشخص می باشد.

هدف اصلی بالابردن وضوح قسمت متناظر با تصویر

می باشد.  $SSIM(x, y)$  مطابق زیر تعریف می شود:

$$SSIM(x, y) = \frac{(\mu_x \mu_y + C_1)(\sigma_{xy} + C_2)}{(\mu_x^2 + \mu_y^2 + C_1)(\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + C_2)} \quad (15)$$

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 شده اند.

#### ۳.۵. لحاظ کردن $SSIM$ در الگوریتم لوکاس-کاناد

$MSSIM(X, Y)$  به نحوی تعریف شده است که هر چه دو تصویر به هم شبیه تر باشند این معیار به ۱ نزدیک تر 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  $SDIS$  می نامیم:

$$SDIS(x, y) = -SSIM(x, y) \quad (16)$$

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

$$\sum_x E_{SDIS} \cdot [I(\mathbf{W}(\mathbf{x}; \mathbf{p})) - T(\mathbf{x})]^2 \quad (17)$$

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

$$\sum_x E_{SDIS} \cdot [I(\mathbf{W}(\mathbf{x}; \mathbf{p} + \Delta \mathbf{p})) - T(\mathbf{x})]^2 \quad (18)$$

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

$$SSD = \sum_x E_{SDIS} \cdot [I(\mathbf{W}(\mathbf{x}; \mathbf{p})) + \nabla I \frac{\partial \mathbf{W}}{\partial \mathbf{p}} \Delta \mathbf{p} - T(\mathbf{x})]^2 \quad (19)$$

<sup>10</sup>Root Mean Square

<sup>9</sup>Structural DISSimilarity



۲ در نظر گرفته شده است. برای مقایسه چند شیوهی دیگر پیاده‌سازی شده‌اند. مقایسه‌ی تصاویر شکل ۷ کیفیت برتر شیوهی پیشنهادی را به خوبی نشان می‌دهد. به عنوان روش آمیختن در روش پیشنهادی در این مقاله و روش ارائه 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 پویش 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.

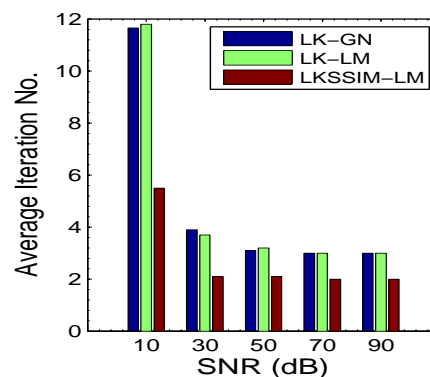
## ۵. جمع‌بندی

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 Kovesi بابت توابع سودمند MATLAB و آقایان وفا خلیقی، مصطفی واحدی و دکتر مهدی امیدعلی بابت زحمات و راهنمایی‌های ارزنده‌ی آنها در زمینه‌ی زی‌پرشین<sup>۱۲</sup> (که این مقاله با آن آماده شده است) تشکر به عمل آورند.

<sup>۱۲</sup> زی‌پرشین با لوگوی X<sub>P</sub>Persian بسته‌ی حروف‌چینی رایگان فارسی مبتنی بر L<sup>A</sup>T<sub>E</sub>X 2<sub>ε</sub> و تحت سیستم‌عامل‌های ویندوز، لینوکس و مک می‌باشد: <http://www.parsilatex.com/>



شکل ۶: میانگین تعداد تکرار مورد نیاز تا همگرایی.

۵(ب) در تصویر ۵(آ) با شیوهی نشان داده شده در شکل ۵؟؟ است. در مقایسات انجام شده، تمام مراحل شکل ۵؟؟ به استثنای مرحله‌ی «دقیق‌تر نمودن مدل با استفاده از ثبت تصویر مبتنی بر ناحیه» یکسان بوده است. نقطه‌ی 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 ۵ و در نرخ سیگنال به نویز<sup>۱۱</sup> 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 ۶ 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 ۵(ج) نتیجه‌ی نهائی افزایش وضوح تصویر ۵(آ) با استفاده از تصویر آموزشی ۵(ب) را نشان می‌دهد. ضریب بزرگ‌نمایی،

<sup>۱۱</sup> Signal to Noise Ratio (SNR)

*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 Computer 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.



(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

شکل ۷: بزرگ شده‌ی قسمتی از نتیجه‌ی اجرای شیوه‌های مختلف برای افزایش وضوح شکل ۵(آ). دقیق‌تر بودن مدل در شیوه‌ی پیشنهادی نسبت به شیوه‌ی ذکر شده در [۷] که فاقد ثبت تصویر مبتنی بر ناحیه است از مقایسه‌ی قسمت بالای نیزه در شکل‌های (و) و (د) مشخص است.

## 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*