# الفصل الخامس

## قياس المواضع والمسافات والإزاحة

## Measurement of Positions, Distances, and Displacement

إن لطول حزمة الضوء (L، المسافة) والموضع (x، y) كثيراً من التطبيقات. إذ إن اشتقاق القيمة المستمرة للمسافة يعطي سرعة عنصر ما. يحدد قياس المسافة المستمر أيضا تغير البعد أو الإزاحة (ΔL) باتجاه المراقب. يمكن استخدام قياس إزاحة الشعاع العمودية (Δy) أو الإزاحة الأفقية (Δx) وزاوية الشعاع ($\alpha$) أو الإزاحة الزاوية ($\Delta\alpha$) على النحو الوارد في الشكل رقم (٥,١).

يمكن استخدام الليزرات أو الديودات الضوئية (LED) كمصدر ضوئي بشكل فعال لقياس المسافة، أو الإزاحة، أو موضع عنصر ما. على وجه الخصوص، فإن قياس المسافة عن بعد (بشكل غير تلامسي) للوصول إلى هدف غير تعاوني هو على جانب كبير من الأهمية بالنسبة للعديد من التطبيقات الرياضية ، و الصناعية ، و في مراقبة حركة المرور.

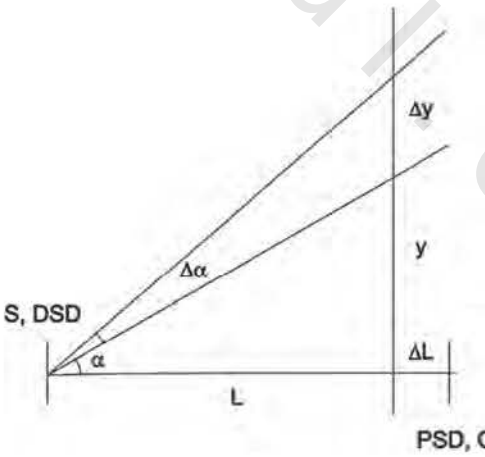
إن الكاشف الحساس للموقع Position sensitive Detector (PSD) عبارة عن أداة فعالة لقياس موضع شعاع ضوئي الشكل رقم (٥,١). بتركيب ضوئي ملائم يمكن أيضاً استخدامه لتحديد الاتجاه نحو مصدر ضوئي أو نحو بقعة ضوء مضيئة على سطح عاكس ناشر للضوء، مما يمكن، على سبيل المثال، من قياس المسافة أو تتبع حركة

جسم متحرك. الشكل الآخر للقياس هو باستخدام عاكس على سطح العنصر وحزمة ضوئية واسعة، الشكل رقم (٥,٢).

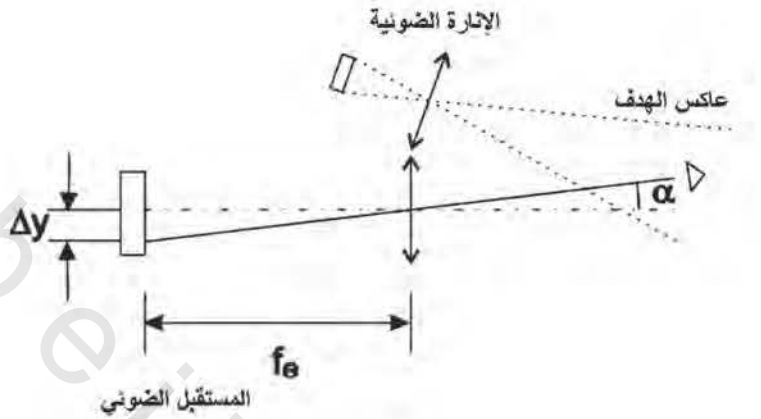
كما هو موضح في الشكل رقم (٥,٢). تُضاء نقطة هدف تعاونية بواسطة مخروط ضوئي من الأشعة تحت الحمراء سواء من ديود ليزري (LD) أو ( من ديود ضوئي عادي LED). يتم جمع جزء الضوء المنعكس من العاكس، ويركز بواسطة عدسة استقبال على الكاشف الحساس للموقع (PSD) والذي يتناسب خرجه طرديا مع إزاحة بقعة الضوء عن مركزه، و التي تتناسب بدورها طرديا مع الإزاحة الزاوية لعاكس الهدف عن المحور البصري للمستقبل. تُحسَب الإزاحة الزاوية للزوايا الصغيرة من العلاقة.

$$\alpha \approx \Delta y / f_e \qquad (٥,١)$$

حيث Δy هي إزاحة صورة العاكس أو بقعة ضوء عن مركز الكاشف الحساس للموقع (PSD) و $f_e$ هو البعد المحرقي الفعال لعدسة المستقبل [69].




الشكل رقم (٥,١). قياس طول (L, ΔL) و موضع (y, Δy) و زاوية حزمة شعاع ضوئية (α, Δα) و S,DSD هو مصدر ضوئي. أو جهاز حساس المسافة و PSD,O هو كاشف حساس الموضع أو العنصر.




**الشكل رقم (٥,٢). تحسس الموضع لعاكس باستخدام إضاءة شعاع واسعة، و PSD**

## (٥,١) قياس المسافة
## Distance Measurement

يمكن الاطلاع على مراجعة جيدة لقياس المسافة المطلقة، على سبيل المثال، في [70، 71]. وترد أحدث المنجزات في وقائع ODIMAP (قياسات وتطبيقات المسافة /الإزاحة الكتروضوئية) حيث عقدت سلسلة من اجتماعات محلية في مدينة نانت (Nantes)– فرنسا (١٩٩٧) و في بافيا Pavia – ايطاليا (١٩٩٩ و ٢٠٠١)، و في أولو Oulu – فنلندا (٢٠٠٤) ، وفي مدريد – اسبانيا (٢٠٠٦).

الطرق الرئيسية المستخدمة على نطاق واسع بواسطة مقياس المسافة الليزري هي التثليث و مقياس التداخل ومقياس زمن الرحلة المبينة في ما يلي:

التثليث هي أساساً طريقة هندسية مناسبة لقياس مسافات تتراوح بين ١ ميليمتر و عدة كيلومترات، و هي تقيس الزاوية (α) من نقطتين إلى الهدف . المسافة بين نقطتين تسمى بالقاعدة (D). ويسمى البعد عن الهدف (L) و يتم الحساب على النحو التالي [72]:

$$L = D/\tan\alpha \approx D/\alpha \qquad (٥,٢)$$

ويبين الشكل رقم (٥,٣) تخطيطات لمسبار التثليث الليزري لقياس الإزاحة (ΔL) بُني باستخدام PSD ككاشف لـ Δα .

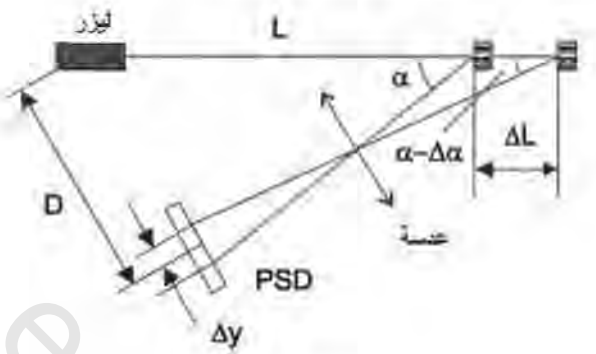
يُسلَّط الليزر بقعة ضوء على سطح عنصر مشتت للضوء، وتقوم عدسة بتجميع جزء من الضوء المشتت من على سطح الجسم لصورة البقعة على حساس الموضع. إذا كان الجسم مزاحاً عن موضعه الأصلي بإزاحة صغيرة قدرها (ΔL)، فإن مركز صورة البقعة سيزاح أيضا بـ Δy عن موقعه الأصلي. و لذلك، فإن إزاحة هذا الجسم تتحدد بقياس إزاحة مركز صورة البقعة على حساس الموضع. يقيس التثليث الليزري عادة إزاحة عنصر في الاتجاه الطولي (على سبيل المثال ، على امتداد حزمة الليزر). واستنادا إلى (٥,٢) فإن الإزاحة (ΔL) يمكن حسابها على النحو الوارد في الصيغة:

$$\Delta L = -(D/\alpha^2)\Delta\alpha = -(L^2/D)\Delta\alpha \qquad (٥,٣)$$

يمكن أن تستخدم العلاقة (٥,٣) أيضا لتقدير الخطأ النسبي للإزاحة المقاسة إذا كان Δα خطأ قياس الزاوية، على النحو التالي:

$$\Delta L/L = -(L/D)\Delta\alpha \qquad (٥,٤)$$

تكون الدقة عادة 10 000 . L/1 000 إذا كان D و L بنفس المرتبة. تحدد الدقة بشكل أساسي بواسطة تمايز و خطية كاشف حساس الموضع PSD.




**الشكل رقم (٥,٣). مخطط طريقة التثليث الليزرية التقليدية لقياس المسافة أو الإزاحة.**

مقاييس التداخل تسمح بقياس المسافات بدقة تعتمد على الطول الموجي للمصدر الضوئي. عادة ما تكون هناك حاجة لشعاع مترابط وينبغي أن يكون الجسم المقاس يشبه المرآة. يمكن أن تسبب هذه الطريقة مايدعى مسألة واضحة للحل. يمكن في بعض الحالات استخدام الضوء الأبيض كمصدر للضوء إذ إن أكبر ميزة لاستخدام مقياس التداخل بالضوء الأبيض كمصدر للضوء هو أنه يمكن أن يستخدم لقياس أجسام ذات سطح خشن بدون أخطاء نظريا [73] . يبين الشكل رقم (٥,٤ أ) رسماً تخطيطاً لمقياس مايكلسون للتداخل والذي يمكن استخدامه مع منبع ذي حزمة ضوئية مترابطة ومع منبع لحزمة واسعة.

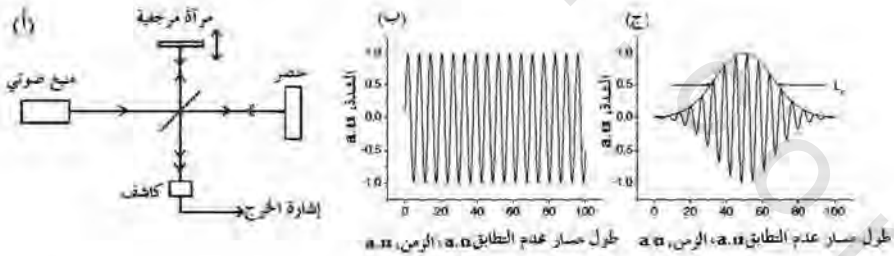
يُحدد تمايز البعد (ΔL) في مقياس التداخل ذو حزمة الضوء الأبيض بطول الترابط لمصدر الضوء. ويمكن أن يحسب من عرض النطاق الترددي (Δλ) لمصدر الضوء على النحو التالي [74] :

$$L_c = \Delta L = ln(2)(2/\pi)(\lambda_o^2/\Delta\lambda), \qquad (٥,٥)$$

حيث λ في العلاقة (٥,٥) عبارة عن الطول الموجي في الفراغ للمصدر الضوئي و$L_c$ هو طول الترابط ذهابا وإيابا. المعادلة صحيحة في الفراغ. المسافات المقاسة عن طريق

مقياس التداخل ذو الضوء الأبيض عبارة عن مسافات ضوئية. هذا يعني أن المسافة الهندسية ممكن أن تحسب بقسمة المسافة الضوئية على معامل الانكسار (n). أطوال الترابط للمصادر الضوئية تتراوح عادة بين ١-١٠ميكرومتر، مما يحد من السماكات الدنيا للعينة المقاسة أو إمكانيات الفصل أو التمييز الدقيق للتفاصيل المنعكسة. وهذه الطريقة مناسبة لقياس الشكل الجانبي لسطح ما، أو سماكة رقاقة معينة أو سماكة طبقة طلاء على سبيل المثال. كما يمكن استخدام هذه الطريقة أيضا في المواد المُشَتَّتة وفي الرسم المقطعي. وبإضافة المسح الضوئي يمكن تحقيق قياسات ثلاثية الأبعاد 3D و تدعى التصوير المقطعي باستخدام الضوء المترابط (OCT)، وتستخدم، على سبيل المثال، لتحليل الأنسجة البشرية [75] أو في تحديد تركيب الورق[٧٦].

يُظْهر الشكل رقم (٥,٤) إشارة الخرج كدالة للزمن إذا كانت المرآة المرجعية تتحرك بسرعة ثابتة فإن تردد أنماط أهداب التداخل ضمن نطاق زمني هو انزياح تردد دوبلر للضوء الأبيض المنعكس من المرآة المتحركة. يمكن أن يكون مفيداً لتصاميم الالكترونيات




الشكل رقم (٥,٤). (أ) مقياس التداخل لميكلسون و (ب) التداخل من أجل ضوء مترابط و (ج) لمصدر ضوئي أبيض كدالة في حركة مرآة المرجع (طول مسار عدم التطابق). $l_c$ هو طول ترابط المصدر الضوئي والذي يحدد في FWHM (كامل العرض عند نصف القيمة القصوى) لغلاف صورة إشارة التداخل.

استخدام كشف حزمة نطاق ضيقة لرفع القيمة العظمى لنسبة الإشارة إلى الضجيج (S/N).

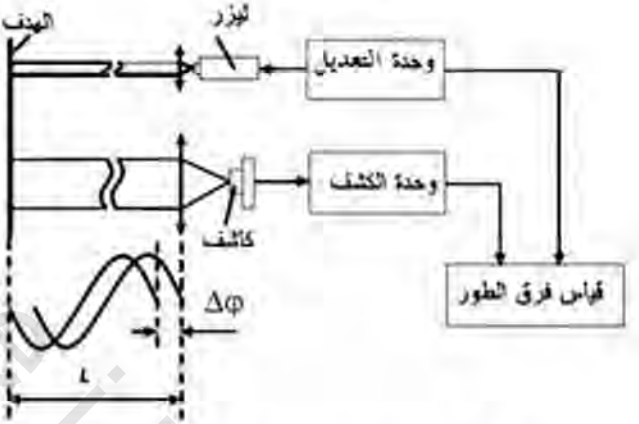
يعتمد التمايز لمقياس مايكلسون التقليدي للتداخل، والذي يستخدم منبعا ضوئيا مترابطا، على دقة قياس الطور داخل الدارة حتى بمستوى من أجزاء النانو، إلا أن هذه الطريقة يمكن أن تستخدم فقط للسطوح الشبيهة بالمرايا ولنطاق مسافات محدودة ولقياس إزاحة ولكن ليس لمسافة مطلقة.

طريقة زمن الرحلة Time-of-flight (TOF) تشير إلى الزمن الذي يستغرقه الضوء المنبعث لينتقل من مرسله إلى عنصر المراقبة وعودته إلى المستقبل. $t_d$ المسافة إلى الهدف تحسب على النحو التالي:

$$L = ct_d/2 \qquad (٥,٦)$$

تبلغ سرعة الضوء (c) حوالي ٣٠ سنتمترا في النانو ثانية. تستخدم هذه الطريقة عادة لقياس مسافات أكبر من ١متر و لا تعتمد دقة القياس بشكل أساسي على المسافة. دقة أجهزة قياس المسافات القصيرة البسيطة تكون عادة من رتبة المليمتر أو السنتيمتر. يمكن أن تُنفَّذ طريقة زمن الرحلة (TOF) بعدة أساليب مختلفة وأكثرها شيوعاً طريقة إزاحة الطور [77] وطريقة التعديل الترددي للموجة المستمرة (FMCW) [78]، وطريقة TOF النبضي [79].

طريقة إزاحة الطور أو الفرق الترددي هي تقنية شائعة للمسح تسمح بقياس المسافات كما هو مبين في الشكل رقم (٥,٥) يتم إرسال حزمة شعاع ليزر على شكل إشارة جيبية مُعدَّلة إلى الهدف، والذي عادة مايكون عبارة عن عاكس، على سبيل المثال، على شكل مكعب زاوي. يُكشَف الضوء المنعكس (من العاكس الناشر أو المحلل) ويُقارن فرق طور الإشارة المنعكسة مع طور الإشارة المرسلة.




الشكل رقم (٥,٥). طريقة إزاحة الطور لقياس المسافة.

إزاحة الطور الناتجة هي 2π مضروبة بزمن الرحلة (2L/c) مضروبة بالتردد المُعدَّل (f) ، لحل المسألة يجب أن يؤخذ في الحسبان عدد الدورات الكاملة خلال الرحلة وإذا كانت الإزاحة الكلية للطور (Δφ) خلال الدورة الواحدة ، فإن المسافة تُعطى على النحو التالي:

$$L = \Delta\varphi c/4\pi f. \qquad (٥,٧)$$

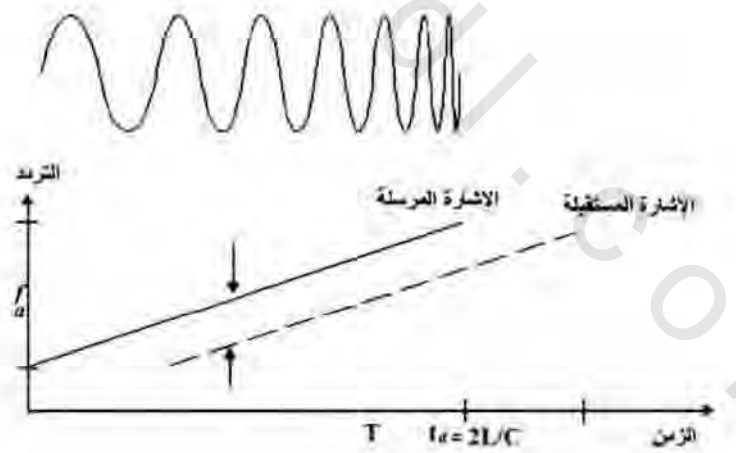
يمكن ضبط حساسية المسافة إلى المستوى المطلوب وذلك باختيار تردد تعديل مناسب. بالنظر لافتراض معقول لمستوى التمايز (الذي هو أصغر تغيير يستطيع الحساس اكتشافه أو التحسس له) بحدود ٠,١°، من الممكن قياس إزاحة ΔL من رتبة ٢ ميليمتر و بتردد $f$ = ٢٠ ميغاهرتز و بمجال قياس واضح أعظمي يصل لـ ٧,٥ متر (c/2f) [80].

تقانة FMCW (التعديل الترددي بالموجات المستمرة) تدعى أيضاً انضغاط النبض أو تردد متغير مع الزمن chirped frequency أو التعديل الترددي المتزايد. هذه الطريقة

تتفرع عن طريقة وقت الرحلة النبضي الذي يجمع بين الطاقة العالية للنبضات الطويلة مع التمايز العالي للنبضات القصيرة. يُبيِّن الشكل رقم (٥,٦) مثالاً على بنية النبضة.

مقارنة مع طريقة إزاحة طور الموجات المستمرة في هذه الحالة فإن تردد الإشارة الجيبية المعدلة للشعاع النبضي سوف تعدل بواسطة بعض الدوال. هذه الدوال ممكن أن تكون على شكل مثلثي، سن منشار أو جيبية. المسافة تتناسب مع إزاحة التردد بين الإشارة المرسلة والإشارة المستقبلة كما هو مبين في الشكل رقم (٥,٦) :

$$L = \frac{\Delta f c T}{2 f_a}, \qquad (٥,٨)$$




الشكل رقم (٥,٦). إشارة FMCW مرسلة لقياس المسافة، $f_a$ هي إزاحة التردد خلال زمن مسح واحد (T)، و $\Delta f$ هو الفرق الترددي بين تردد الاشارة المرسلة وتردد الاشارة المستقبلة و $t_a$ هو زمن عبور النبضة.

يستخدم عادة كاشف مرشح توافقي. يمكن تنفيذ المرشح باستخدام مرشح ترددي زلقي (جرفي) أو خطوط تأخير. يتناسب تمايز القياس عكساً مع مجال تارجح تردد التعديل. قدرة المستقبل على تحسين تمايز النطاق فوق نطاق النظام التقليدي (طول النبضة) يدعى بمعدل انضغاط النبضة $G=f_a.T$. والذي من الممكن استخدامه لحساب تمايز المسافة على النحو التالي [81] :

$$\Delta L = cT/2G = c/2f_a \qquad (٥,٩)$$

وبدلا من ذلك، فإن G تعطي أيضا معدل خفض قدرة الذروة اللازمة للحصول على تمايز بدون انضغاط. لم يُحسَّن المجال الأصغري بواسطة هذه العملية. وكذلك كما يمكن تعديل التردد الضوئي (الطول الموجي) لليزر كما هو الحال في رادار الأمواج الميكروية. يمكن الحصول على دقة قياس حوالي ٠.٢ ملم لمجال توليف ~ ٢٥٠ GHz. كما يمكن أن تسبب التأثيرات الناتجة عن حركة العنصر الذي هو موضع الاهتمام أو المسح الضوئي لأشعة ليزر أخطاء قياس منهجية كبيرة بسبب انزياح دوبلر أو بسبب تغيرات الطور التابعة للزمن. و يمكن أيضا تحقيق الانضغاط النبضي باستخدام التعديل الغلافي للإشارة الحاملة باستخدام الترميز الثنائي المتتام، مثل ترميز باركر أو فرانك [82]. نوع المستقبل هو ترابطي يحسب باستمرار الترابط التصالبي بين النبضات المرسلة والمستقبلة ومعدل التصحيح هو طول الترميز المستخدم. ويعطي التأخير عند أقصى ترابط زمن الرحلة. نسبة الانضغاط هي الآن طول (الترميز) المستخدم.

قياس المسافة ضوئياً هو مجال واسع جداً ونظام ينموسريعا. يُركز هذا الفصل على طريقة زمن الرحلة النبضي غير المُعدَّلة nonmodulated لقياس المسافة، و يستحضر بعض التطبيقات الواعدة.

### (٥,١,١) قياس المسافة اعتماداً على زمن الرحلة للنبضات الليزرية

**Laser Pulse Time-of-Flight Distance Measurement**

غالباً ماتسمى مقاييس المسافة الليزرية النبضية بـ اللادارات LADARS أو ليدرات LIDARS ( (اللادار، كاشف ليزري ومحدد مدى والليدار، كاشف ضوئي ومحدد مدى) أو مع مصطلح محدد المدى الليزري. يتضمن الرادار الليزري كلا من جهاز تتبع ليزري (محدد المدى الليزري) وجهاز قياس بعد صورة ثلاثية الأبعاد لعنصر أو امتصاص و تشتت الضوء من قبل الجو. في هذا الكتاب فإن المصطلح للرادار الليزري سيستخدم من أجل قياس بعد ثلاثي الأبعاد.

يقيس نظام TOF زمن رحلة ما بين انبعاث نبضة الضوء وعودة صدى النبضة من العنصر باستخدام الفيزياء الأساسية حيث تحسب المسافة بضرب سرعة الضوء بزمن الرحلة اللازم لقطع المسافة. في هذه الحالة فإن الزمن المقاس يمثل الانتقال لضعفي المسافة، و يجب بناء على ذلك أن يقسم على اثنين ليعطي الزمن الحقيقي للوصول للهدف (٥,٤). للحصول على دقة ١ ميليمتر يجب أن تكون دقة قياس المدة الزمنية تساوي ٦,٧ بيكوثانية [71].

بما أن نبضة واحدة كافية لتحديدٍ لا لبس فيه عن بعد لمسافة بدقة سنتيمتر ودقة تعتمد فقط و بشكل ضعيف على المسافة، لذا فإن هذه الطريقة مناسبة خاصة، على سبيل المثال، في التطبيقات التي تتضمن قياس مسافات أكبر من ١متر. و في التطبيقات التي لايستخدم فيها عاكس و في تطبيقات القياس السريع مثل المسح أو قياس حركة العناصر. بالإضافة إلى أنه، ممكن تحقيق دقة ميليمتر أو حتى أجزاء الميليمتر. تنشأ ميزة إضافية لنظام TOF النبضية من الطبيعة المباشرة لاستشعاره، فاتباع كلتا الإشاراتين المرسلة والعائدة أساسا نفس الطريق المباشر إلى العنصر والعودة إلى المستقبل قللت أثر الظل في قياس الأسطح المعقدة ومكنت من الحصول على دقة من رتبة الميليمتر أو عدة الميليمترات.

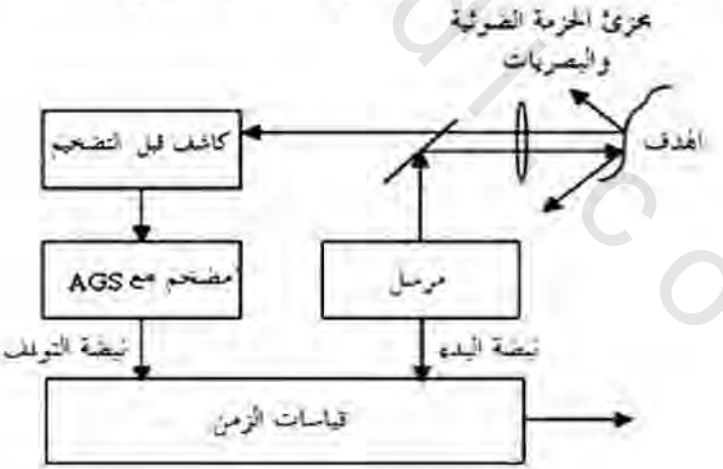
تتطلب بعض التطبيقات الجديدة مثل أجهزة الاستشعار لمراقبة حركة المرور، وأجهزة إنذار المركبات ضدد الصدمات وقربها، وأجهزة الاستشعار المستخدمة في

حماية منطقة مقدمة المركبات (حارس الأمان) قيودا على حجم الجهاز والكتلة واستهلاك الطاقة. ولتحقيق هذه الأهداف، يجب أن تنجز كتلة البناء الأساسية لمحدد المدى TOF على شكل دوائر متكاملة بأداء عال.

## التركيبات

**Constructions**

يتألف جهاز قياس المسافة النبضي TOF (محدد المدى) من مرسل ليزري يبعث نبضات تدوم ١-٥٠ نانوثانية وقناة استقبال تتضمن (PIN) أو ديود ضوئي انهياري (APD) ومضخمات و (تحكم تضخيم آلي) AGC ومميز زمني و مجموعة قياس المدة الزمنية. نبضة الضوء المنبعثة (نبضة البدء) تشغل وحدة قياس الفترة الزمنية ونبضة الضوء المنعكسة (نبضة الإيقاف) توقفه. تتناسب المسافة إلى الهدف مع الفاصل الزمني. ويبين الشكل رقم (٥,٧) المخطط الصندوقي لمحدد المدى الليزري.




**الشكل رقم (٥,٧). المخطط الصندوقي لجهاز تحديد المدى الليزري TOF.**

يتوقف اختيار نوع الليزر على نطاق القياس المقصود والسرعة المطلوبة. من أجل مسافات طويلة (تصل إلى عدة كيلومترات)، يمكن استخدام ليزر النيوديوم ياغ Nd-YAG المزود بمفتاح تبديل معامل الجودة Q أو ليزر الألياف والذي يعطي قدرات عظمى تصل إلى مستوى ميغاواط. لقد سمح انخفاض سعر الديودات الليزرية النبضية والقادرة على إنتاج قدرة ليزرية عظمى تصل لعشرات الواطات بقياس مسافات تصل لبضع مئات الأمتار وحتى أطول من ذلك باستخدام الجمع الإرتباطي أو الانضغاط النبضي. إن تكرار تردد نبضات ليزرات النيوديوم ياغ Nd-YAG يكون عادة منخفضاً، في حين يمكن استخدام الليزرات الثنائية عند معدل من عشرات الكيلوهيرتز، و حتى أنه يمكن في نوع DH أن يصل لمستوى ميغاهرتز. لقد أدى التطور السريع لليزرات النيوديوم ياغ Nd-YAG المضخوخة بواسطة الليزرات الثنائية وليزر الألياف إلى زيادة تطبيقاتها في أجهزة كشف المدى. بدلاً من المكونات المعتمدة على السيليكون ذات الأطوال الموجية المتراوحة بين ٤٠٠ -١١٠٠ نانو متر والتي تستخدم مكونات من انديوم زرنيخ الجاليوم InGaAs التي قدمت حلاً لهذه المشكلة (تعمل بطول موجي ١٥٠٠ نانو متر) للحصول على أنظمة أفضل أمان للعين.

يجب أن تكون مراحل التكبير عالية الخطية والحساسية ذات نسبة إشارة إلى ضجيج (S/N) عالية ولها تأخير ثابت مع عرض نطاق ترددي كاف لمتابعة إشارة الدخل، وعادة ما تتكون من مكبرات أولية ومخمدات ومكبرات لاحقة، أما المكبرات الأولية فتحول التيار في الثنائي الضوئي إلى جهد و تكون عادة من نوع مكبر نقل الممانعة trans impedance. الميزة الرئيسية لمكبرات نقل الممانعة هي انخفاض مقاومة مدخلها. فكلما ارتفعت قيمة المقاومة ارتفعت نسبة الإشارة إلى الضجيج إلا أن عرض النطاق الترددي ينقص، أما مرحلة التكبير اللاحقة والتي عادة ماتكون عبارة عن مكبرات جهد يمكن أن تكون ذات تكبير مُتَحكم به.

يمكن التحكم بعرض النطاق الديناميكي لإشارة الدخل الضوئية. غالبا ما يتجاوز المدى الديناميكي لإشارة الدخل الضوئية مدى المميز الزمني ( دارة التشغيل والإيقاف الزمنية) (off circuit–time pick) لوحدة قياس الفاصل الزمني، بسبب الاختلاف في المسافة من الهدف عن انعكاسها. لذا يجب أن تُخفّض الإشارة لمستوى خطأ المسير الأصغر للمميز الزمني. للتغلب على هذه المشكلة، يمكن استخدام أنواع مختلفة من المخمدت عند مرحلة التكبير. ممكن أن يُنفّذ المخمد على سبيل المثال بخلية تحكم بالكسب نمط تيار. بواسطة ليدرات 2R–R أو بواسطة تعديل جهد انحياز ADP [٨٣] . ممكن استخدام مخمد ضوئي قابل للتعديل عند المستقبل الضوئي لتحقيق التحكم بالكسب. ميزة هذه الطريقة عن طريقة مراقبة الكسب كهربائياً استقرار تأخيرها على مدى واسع من الطيف الترددي إلا أنها ممكن أن تكون بطيئة جداً في العديد من التطبيقات. يجب وضع مخمدات الكترونية بعد المضخمات لإنقاص الضجيج ولكن قبلاً لتحسين الخطية. يحدد التخميد حسب سعة الإشارة والتى بدورها تحدد بواسطة كاشف الذروة.

إن وحدات قياس الفاصل الزمني والمرسل هي أيضاً حرجة لدقة النظام. إذ يجب أن يكون المرسل قادراً على إصدار نبضة ليزرية ثابتة الشكل. ربما هذه دعوة لتحقيق استقرار حراري في الديود. الظاهرة الديناميكية للديود الليزري، اهتزازات الاسترخاء النبضي ، يجب أن يؤخذا بالحسبان عند تصميم المخطط كما أنهما يقودان بسهولة لتغيرات معتبرة في شكل النبضة الليزرية.

تقاس المدة الزمنية بين نبضتي التشغيل والتوقف بواسطة محول زمني – رقمي (TDC) الذي هو جهاز لقياس المدة زمنية هو مستقر، سريع، دقيق، و يستخدم أسلوب العد الرقمي إلى جانب طريقة الاستيفاء التناظرية (التمثيلية) أو الرقمية [٨٤].

يكون عادة تمايز الشوط الواحد (العينة الوحيدة) (single-shot resolution) للـ (TDC) أفضل من تأرجح التوقيت الناشئ عن الضجيج.

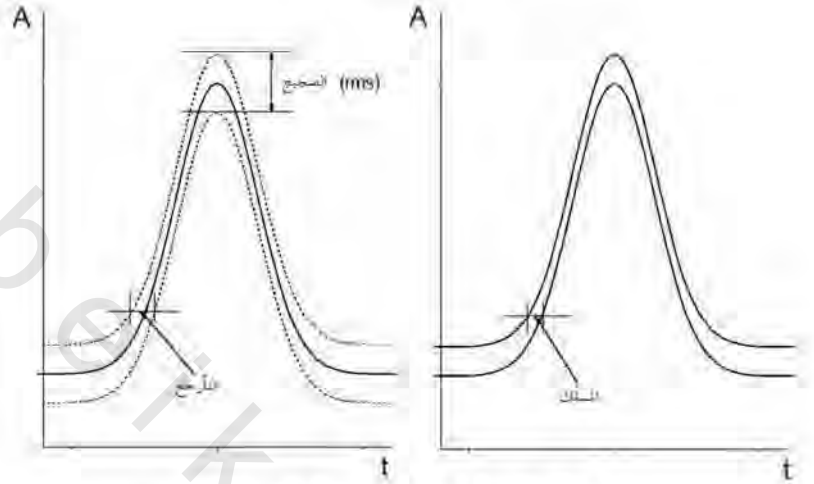
## تأرجح التوقيت الناشئ عن الضجيج، و المسلك، و عدم الخطية، و الانجراف ومصادر أخطاء أخرى

**Timing Jitter and Walk, Nonlinearity, Drift and Other Error Sources**

المصادر الرئيسية لعدم الدقة في محددات المدى الليزرية سببها تأرجح التوقيت الناشئ عن الضجيج، والمسلك، و عدم الخطية، و الجرف. تتضمن مصادر الضجيج النموذجية الضجيج المتولد من الالكترونيات و القفزة الضجيجية الناتجة عن الخلفية الإشعاعية المولدة للتيار والقفزة الضجيجية الناتجة عن تيار الإشارة. يحدد التأرجح في التوقيت بشكل أساسي دقة قياس المدى. كمية تأرجح التوقيت ($\sigma_t$) تتناسب طرداً مع سعة الضجيج ($\sigma_u$) وعكساً مع ميل نبضة التوقيت عند لحظة التوقيت (du/dt). وممكن أن تقرَّب بقاعدة التثليث:

$$\sigma_t = (\sigma_u)/(du/dt). \qquad (٥,١٠)$$

ممكن تحقيق تمايز نموذجي للشوط الأحادي برتبة الـ١ سنتمتر مع معدل جيد لنسبة الإشارة إلى الضجيج (S/N=100). باستخدام عرض حزمة ترددية ١٠٠ ميغاهرتز لقناة الاستقبال و مع ذلك تتدهور الدقة بزيادة المسافة و تتناقص سعة النبضة متناسبة مع مربع المسافة. التغيرات في سعة النبضة و شكلها يؤديان لنشوء خطأ في التوقيت في دارة زمن التحفيز (دارة انتخاب الوقت) و هذا الخطأ يدعى خطأ المسلك walk error. التأرجح و المسلك Jitter and walk في قيادة التوقيت تظهران في الشكل رقم (٥,٨) [85].




**الشكل رقم (٥,٨). تأرجح الاستقرار والمسلك.**

المميز الزمني هو جزء مهم جدا لقياس دقة نظام. مهمة المميز هي مراقبة معلومة الزمن من النبضة الكهربائية للمكبر الأولي الكشفي بالإضافة لإنتاج إشارة تحفيز (تشغيل) في اللحظة الصحيحة.طريقة اختيار الاشتقاق الزمني تعتمد على تمايز الزمن المنشود، ومعدل العد والمدى الديناميكي اللازم للنبضة. المبادئ الشائع استخدامها في تصميم مميز تتضمن توقيت حواف رائدة (بسعة ثابتة) وتوقيت عبور الصفر (الاشتقاق)، وتوقيت اللحظة الأولى (التكامل) وتوقيتا جزئيا ثابتا. يعوض التمييز الجزئي الثابت (CFD) بواسطة نبضات ذات أشكال مثالية من أجل المسلك walk الناتج عن تغيرات كل من السعة و زمن الصعود، وهو شائع الاستخدام في أجهزة قياس زمن الرحلة لمحددات المدى الليزرية.

المبدأ وراء عملية CFD هو البحث عن اللحظة في النبضة التي يولد ارتفاعها نسبة ثابتة لسعة النبضة. ينتج حدوث هذه النقطة نبضة إثارة (تحفيز). يمكن تحقيق لحظة النسبة الثابتة باستخدام كبل تأخير ومقارن بحيث تغذي الإشارة المُوَّهنة و القادمة من المستقبل مباشرة المدخل السالب والإشارة المُؤخرَة تُغذي المدخل الموجب لمقارن مربوط

منطقياً مع باعث فائق السرعة (ECL) والذي يضخم الفرق بين الإشارة المخمدة والمؤخرة [86]. والإشارة الخارجة من المقارن تغذي TDC. عوضت CFD عن السير walk الناجم عن السعة وزمن الصعود ولكن ليس عن السير الذي تسببه تغيرات الشكل غير الخطية. يعوِّض عبور الصفر و توقيت لحظة البدء عن تغيرات السعة بينما يفشل توقيت الحافة الأمامية عن التعويض عن أي تغير مُوَصَّف. وهكذا، وبحساب وسطي لـ مئة قياس متعاقب، يمكن تحسين التمايز النهائي إلى مستوى ميليمتري، على سبيل المثال يكون زمن القياس المقابل لـ ١ ميلي ثانية بمعدل نبضي ١٠٠ كيلو هرتز. فإذا كان مستوى متوسط الخطأ الإحصائي مهملا، يعرف دقة النظام عن أخطاء منهجية مثل اللاخطية في مقياس الفاصل الزمني للوقت والإنزياح. كما أنه من الممكن بالتصميم الدقيق للنظام تقليل هذه الأخطاء إلى مستوى ميليمتر. إذا بلغ معدل الخطأ الإحصائي فإن دقة النظام تعرف على أنها أخطاء منهجية مثل عدم الخطية في الفاصل الزمني لقياس للوقت والانزياح. يمكن أن يُقلِّل التصميم الدقيق للنظام من هذه الأخطاء لمستوى الميليمتر.

كما يجب أن يعتمد أداء الالكترونيات على متطلبات فنية وتقنية محددة على سبيل المثال دقة المجال واستهلاك الطاقة. يمكن استنتاج العوامل الرئيسية التي تحد من دقة قياس جهاز محدد المدى الليزري TOF آلي يمكن تلخيصها على النحو التالي:

١- الضجيج الذي هو خطأ عشوائي رئيسي يحدد دقة جهاز الاستقبال. إذ يتكون بشكل رئيسي من الضجيج الناتج عن تيار الظلام والضجيج المتعدد الناتج عن APD، و الضجيج الناتج عن المكبرات، و الضجيج الناتج عن المخمدات و الضوء الخلفي.

٢- خطأ المسلك Walk error، يعتمد على تغيرات سعة النبضة وشكلها وبالتالي على تغيير نقطة التوقيت (التزامن) ، وعلى لاخطية المتحكم وعدم مثاليته وتغير زمن انتشار النبضات، مما يسبب أخطاء منهجية.

٣- خطية جميع المكونات تقريبا: APD، المضخمات الأولية/ و اللاحقة و المخمدات ووحدة قياس الفاصل الزمني.

٤- الاستقرارية، و تتأثر بشكل أساسي بتغيرات درجة حرارة الجهاز.

٥- عرض النطاق الترددي للإلكترونيات و الذي يجب أن يكون واسعاً بما يكفي لإشارة الضوء المستقبلة، أي عرض النطاق الترددي للإلكترونيات، يجب أن يشمل طيف إشارة الدخل

٦- تُحدَّد الحدود الدنيا للمدى الديناميكي بشكل أساسي بالضجيج الإلكتروني و تُحدَّد الحدود العليا له بأقصى تيار ضوئي لد APD، ومجال جهد تشغيل المضخمات.

٧- تظهر مصادر عديدة من الأخطاء بناء على محدودية قطر الشعاع. قد يسبب اختلاف الإضاءة داخل المنطقة المضاءة و الانعكاسية، وشكل العناصر، وتعددها، وما إلى ذلك نتيجة خاطئة أو مفتوحة لتفسيرات مختلفة.

## تطبيقات جديدة واتجاهات التطوير

## Novel Applications and Development Trends

يجري حالياً تطوير العديد من التطبيقات الجديدة لقياس زمن عبور نبضات الليزر لاستكمال التطبيقات التقليدية. وهناك طريقة واعدة تتضمن استخدام طول مسار النبضات الضوئية في النسيج البشري، و لباب الورق و الورق، أو الألياف الضوئية كمبدأ للاستشعار. وفي هذا السياق، فإن مصطلح هجرة الفوتون كثيرا ما يستخدم لوصف انتشار الضوء في أوساط مشتتة للضوء مثل الأنسجة البشرية. في الأوساط العكرة، تسلك الفوتونات عدد من المسارات المختلفة مما يوسع نطاق نبضات الضوء القصيرة. و يجري حاليا التحقق من استخدام تقنيات زمن الرحلة لتصوير أنسجة ليِّنة (التصوير المقطعي الضوئي المحوري) لتطبيقها بنشاط كبير من قبل الباحثين مثلا في

تشخيص سرطان الثدي وتصوير حالة الأكسجة في دماغ حديثي الولادة [87]، راجع الفقرة ٥,٥,٢. من وجهة نظر صناعة الورق، فإن واحد من أهم خصائص ورقة الرسم هو تفاعل الضوء مع بنية الورقة. أحد طرق الحصول على فهم أكثر تفصيلاً لنشر الضوء في الورق ولب الورق هي قياسات عالية الدقة لتأخير نبضات الضوء التي تعاني منها عند مرورها عبر ورقة أو عينة من اللب [88]، انظر الفقرة (٥,٥,٣).

أما بالنسبة للمواد المركبة، يمكن أن تدمج الألياف الضوئية فيها خلال عملية التصنيع. يمكن أن يقاس زمن رحلة نبضة الضوء في الألياف الضوئية بتمايز من بضعة بيكوثانية باستخدام تقنية مشابهة لـ OTDR مقياس الانعكاس في المجال الزمني الضوئي. تستند الحسابات على حقيقة أن زمن رحلة النبضة الضوئية في الألياف تكون تابعة لطول ولمعامل انكسار الألياف، والتي تتأثر بالإجهاد، و درجة الحرارة، و الضغط [89]، انظر الفقرة (٥,٥,٤).

وضعت التطبيقات التجارية في القطاع المدني عدة قيود على الأجهزة التي تعتمد على الليزر والتي ينبغي التقيد بها. أولا، ما يسمى شرط الفئة الأولى لليزر (سلامة العين) والتي تحد من القدرة العظمى لليزر النبضي لبضعة واطات، ومع ذلك، فإن الكشف الموثوق لأهداف ذات انعكاس منخفض أو ذات درجة حرارة مرتفعة، يتطلب ذروة قدرة ضوئية عالية بما فيه الكفاية. يساعد استخدام نبضات من رتبة البيكوثانية في التغلب على مشكلة سلامة العين، ولكن على حساب المُسْتَقْبِل مع عرض نطاق ترددي مرتفع. حيث تعطي النبضات الأقصر أيضا دقة أفضل [90]. الضوء الليزري الذي يعمل بطيف الأشعة تحت الحمراء البعيدة (أعلى من ١٤٠٠ نانو متر) يدعى آمناً للعين إذا استخدمت مستويات قدرة مُعدَّلة والتوجه هو الانتقال إلى ذلك المجال من الطول الموجي لاستخدامه في التطبيقات في أي مكان. يتم تحديد مدى الضرر البصري بواسطة الإشعاع الليزري بمدة التعرض، وأبعاد حزمة الإشعاع الليزري.

التعرض الأقصى المسموح به Maximum permissible exposure (MPE)، هو مستوى الإشعاع الليزري الذي يمكن أن يتعرض له أي شخص من دون أن يحدث تأثيرات خطرة أو تغيرات بيولوجية في العين. تُحَدَّد مستويات (MPE) ، كدالة لطول موجة الليزر، وزمن التعرض و تكرار النبضات. عادة مايعبر عن الـ MPE سواء حسب التعرض المشع $Jcm^{-2}$ أو الإشعاع $Wcm^{-2}$ لطول موجة معينة ومدة التعرض. وتحدد هذه الحدود حسب معايير الليزر الدولية.

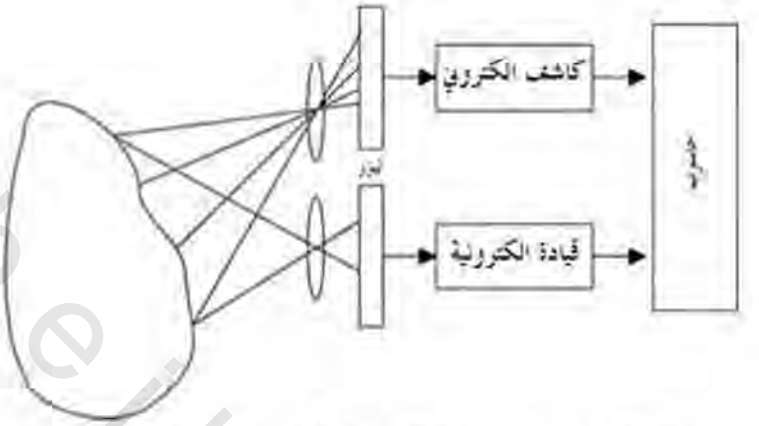
الصفات المرغوبة جدا في جهاز محدد المدى تتضمن فعالية التكلفة .و وجوب خفض كل من الحجم والوزن، بالاضافة إلى خفض استهلاك الطاقة وذلك لزيادة مجالات تطبيقاته الممكنة. يمكن لهذه الأهداف أن تتحقق باستخدام الدوائر المتكاملة الخاصة بالتطبيق المحدد. لرؤية بعيدة المدى تتمثل في تحقيق مكون محدد مدى TOF كنظام ميكروي (صغري) يضم جميع العناصر الالكترونية الأساسية من: ديود ليزري، كاشف ضوئي ، قناة استقبال ومقياس لقياس الفاصل الزمني المختلط، بحيث تتوضع مجتمعة على دارة واحدة هجينة (الشكل رقم ٥,٩).

الشكل رقم (٥,٩). ثلاث مراحل لتطور أبحاث محدد المدى النبضي rangefinder TOF في جامعة أولو، فنلندا ونوبتيل أوي (بإذن من نوبتيل).

الرادار الليزري في الشكل رقم (٥,٩ أ) هو منتج تجاري لقياس سماكة التلبيس الساخن للمحول يتم تحديد مدى ضرر التشعيع الليزري للعين ، بمدة التعرض وحجم الحزمة و تحمل المحول للسخونة في مصانع الصلب وقد تم بناؤه باستخدام مكونات منفصلة وحقق مستوى دقة قياس بالسنتيمتر مع استهلاك طاقة حوالي الـ ٢٠ واط، ويؤمَّن المسح بالاتجاهين x,y يدوياً. الشكل رقم (٥,٩ ب) يُظهر جهاز صغير لتحديد المدى يُستَخْدَم في مراقبة حركة المرور، الجهاز مؤلف من محدد مدى مع إمكانية قياس السرعة ASICs، ويُستخْدَم في قناة المُسْتَقْبِل لقياس المدة الزمنية. يُظْهر الشكل رقم (٥,٩ج) مثالاً عن جهاز لتحديد المدى مدمج للبيئة القاسية.

## (٥,٢) الرادار الليزري
## Laser Radar

في القياسات الثلاثية الأبعاد 3D، تم تجهيز محدد مدى ليزري مع مُرَمِّز للزاوية قادر على تحديد إحداثيات نقطة القياس. يتم المسح ميكانيكياً أو يدويا أو تلقائيا. في بعض التطبيقات، يكون المسح اليدوي كافيا (الشكل رقم ٥,٩ أ) ولكن في الأغراض الحرجة زمنياً تكون هناك حاجة لزيادة معدل القياس في نظام القيادة الآلية. وتشمل التقنيات الأساسية رأس قياس ماسحا أو فقط شعاع قياس ماسحا بقياس حزمة الشعاع بواسطة مرايا تحركها جلفانومترات (الجلفانومتر القذفي). الرادار الليزري هو جهاز يستخدم إحدى تقنيات قياس المسافة كما وصّفت من قبل، ويمسح اتجاه قياس المسافة في بعدين. هذا ما يسمح لإنشاء صورة للمسافة، أو بتعبير أدق صورة للأشكال الجانبية للعمق لجسم ما، حسب الاقتضاء، على سبيل المثال، في مجال الروبوتات.




**الشكل رقم (٥,١٠). المخطط الصندوقي لمسح المستوى المحرقي .**

ويمكن استخدام المسح في مستوى محرقي بدلا من أشعة الليزر الضيقة و التي تمسح السطح ميكانيكيا، نقطة نقطة. هذا يسمح للمجموعة أن تكوِّن الخريطة دون الحصول على مسح الشعاع الميكانيكي. نتيجة لذلك يتحسن بشكل كبير أداء رسم الخرائط ثلاثية الأبعاد، وخاصة فيما يتعلق بقياس الوقت، كما يخفض ذلك بشكل كبيرٍ من التعقيدات الميكانيكية وفي متطلبات الحجم والاستهلاك. يوضح الشكل رقم (٥,١٠) مبدأ المسح البؤري.

يضيء شعاع ليزري واحد مجال رؤيته على السطح و يُرى الجزء المضاء من السطح باستخدام مصفوفات كشف منفصلة عادة مصفوفة APD. حيث يغطي كل كاشف الجزء الخاص به من مجال الرؤية المضاءة بواسطة الليزر. يتم تحليل إشارات الكاشف في النطاق الزمني، و يتم احتساب المسافات إلى نقاط معينة على أساس قياس الفواصل الزمنية. ويمكن للنظام في وقت واحد أن يقيس المسافات في اتجاهات متعددة دون تحريك أي من الأجزاء [91].

تتطور مصفوفة الديود الضوئي الانهياري (APD) بسرعة وذلك بالاعتماد على البحث المتعلق بالـ(PET) التصوير المقطعي بالإصدار البوزيتروني للكشف عن الوميض لتحل محل الجهاز اللاقط للشحنة CCD [92]. عادة ما تكون مصفوفة المستقبل APD مؤلفة من٢×٢ لتصل إلى ١٢٦× ١٢٦ نقط صورية (pixels) (لا تزال في مرحلة التطوير). معظم هذه المصفوفات لايحتوي دارات متكاملة لقياس المدة الزمنة. استثناء واحد هو مصفوفة كواشف ٣٢ × ٣٢ من مختبر لنكولن MIT Lincoln في معهد للتقنية مزودة بدوائر مؤقتات رقمية نوع ٠,٣٥ميكرومتر CMOS لكل بكسل (نقط صورية). يحتوي كل بكسل هجين على ديودات كاشف انهياري يعمل بنمط جيجر و دائرة توقيت [93، 94].

مصفوفات الديودات الكاشفة الانهيارية APD ٣٢ × ٣٢ صُنِّعت من ديود ذي منطقة فعالة قطرها ٣٠ ميكرومترا. الخطوة الواحدة على مصفوفات الـ APD هي ١٠٠ ميكرون تقدم عامل ملء ٧ ٪، وهي نسبة منخفضة جدا مقارنة لما في الظاهر ٩٠ ٪ من التطبيقات الثلاثة المحتملة (المواعدة واللقاء، و الهبوط على الكواكب، والملاحة الاستكشافية). وفي حين أنه من الممكن زيادة عامل الملء بربط مصفوفة عدسات ميكروية لمصفوفة الكاشف، هذا من شأنه أيضا لأن يزيد من تدفق الضوء الخلفي . البديل هو استخدام عنصر بصري حارف لنقل حزمة شعاع ليزر وحيد النمط لنموذج مصفوفة من ٣٢×٣٢ بقعة ضوئية (بيكسل) إلى الهدف. يجب محاذاة العناصر الضوئية بحيث تكون كل بقعة ليزر متصلة مع بيكسل. تزيد التقنية هذه من معامل الملء وتُنقص من خطأ الكشف الناتج عن الخلفية الضوئية.

من أجل الحصول على مقاطع بمعدل أعلى عند ذلك العمق، هناك رقائق استشعار مماثلة للواقط الضوئية CCD، مع الكترونيات داخلية لكشف انزياحات الطور بحيث يتمكن آنياً من قياس المسافة لكل بيكسل. مما يسمح لتصوير سريع ثلاثي الأبعاد بأجهزة مدمجة [95].

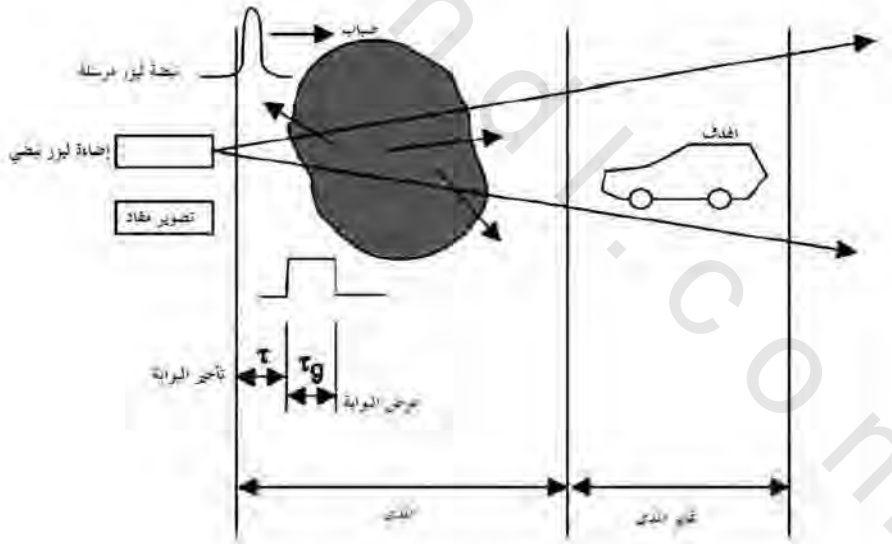
## (٥,٣) التصوير المقاد
## Gated Imaging

تستخدم أنظمة التصوير المقاد بالمدى Range gated imaging systems إضاءة ليزرية نبضية لتشكيل صورة للهدف. يُزامَن في مثل هذه الأنظمة وقت التعرض للكاميرا مع زمن وصول نبضة الليزر المرسلة بحيث إن مسجلات الصورة تكشف وصول الضوء فقط من مسافة محددة مسبقاً، وبالتالي القضاء على أي انعكاس ارتدادي لكاميرات التحكم بالمدى والانعكاسات غير المرغوب بها خارج مجال الاهتمام. تشمل المزايا الرئيسية لكاميرات التحكم بالمدى مقابل تلك غير الفعالة إمكانية تحديد آني للمدى، والقدرة على الرؤية من خلال الدخان والضباب وغيرها مثل الغطاء النباتي. مقارنة مع ما تؤمنه صور الأشعة تحت الحمراء الحرارية أو صور رادار الأمواج الميكروية من ضآلة وضوح في أحوال الطقس الرديئة إلا أنها أفضل من ناحية تمايز (دقة) التصوير الزاوي بسبب الموجات القصيرة المستخدمة في الإضاءة. كما أنها تتمتع بإمكانيات كبيرة في مجال تعزيز الرؤية المركبة إلى جانب التطبيقات العسكرية التي تستخدم بها نظم التصوير المقادة في مجال الرؤية المدعمة والمتنقلة. كما يوضح الشكل رقم (٥,١١) مبدأ التحكم بالرؤيا.

تضيئ نبضة ليزر قصيرة المشهد بكثافة بوجود أنبوبة تصوير مرتفعة الكسب مقادة زمنياً (gated) بحيث تكون النتيجة سلسلة من الصور في شرائح النطاق. يتم تزامن التحكم بالتأخير ($\tau$) مع زمن عبور نبضة الليزر المرسلة وعرض النبضة ($\tau_g$) مع مدة بقاء النبضة الليزرية. يمكن الحصول على صور ثلاثية الأبعاد 3D من سلسلة من صور ثنائية البعد 2D بإزاحة القيادة. الأنابيب التي يمكن أن تكون حساسة في العين عند أطوال موجية آمنة (١,٥ ميكرومتر) لها دقة تمايز مكاني عال ٣٠- ٦٠ (بيكسل لكل ملم) يمكن باستخدام بصريات مناسبة تحقيق تمايز لأهداف بعيدة المدى. بدلا من ذلك، يمكن لكاميرات CCD المعززة

التقاط صور كدالة لتأخير نبضات الليزر [96]. إذا ما استُخدِّم ليزر نبضي بطاقة كافية فإنه يمكن الرؤية من خلال الضباب والحواجب الأخرى [97].

يُحتاج عادة لنبضات ليزرية قصيرة جدا (أقل من ١ نانو ثانية) وقدرة فعالة حتى (١ ميغاواط) في مجال الأنظمة المقادة. القضايا الرئيسية لنبضات الإضاءة هي القدرة الكلية، وعرض النبضة، والطول الموجي، والانحراف. تحدد القدرة الكلية مجال التشغيل وكثافة التشتت والتي من أجلها يكون النظام مفيداً. يحدد عرض النبضة أقصر عرض بوابة قابل للتطبيق مما يحد من مدى التمايز والقدرة على القضاء على الضوء المتشتت. يعتمد الطول الموجي الصحيح على وسط التشتيت، والطيف المطلوب للتصوير و قضايا سلامة العين. تذبذب نبضات الإضاءة يؤثر على تمايز المدى (المقاد) للنظام.

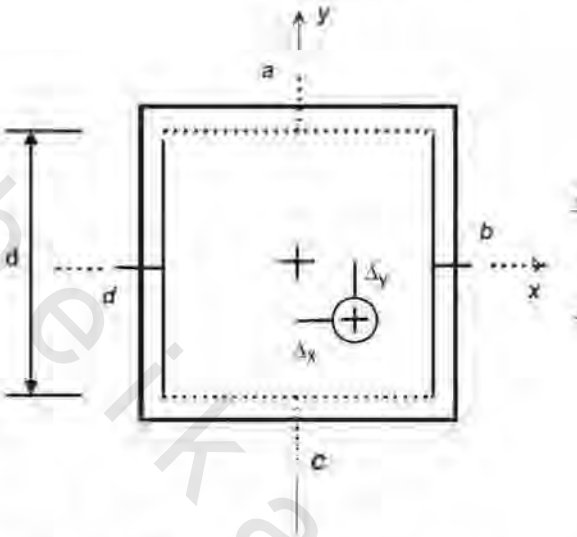



الشكل رقم (٥,١١). التصوير المقاد.

تكون النبضات القصيرة، الأقل من ١٠٠ بيكو ثانية، مناسبة خاصة لتشغيل أجهزة تصوير مقادة بالمدى في نمط العد الفوتوني. يعتمد هذا التصوير على أساس وضع كاشف ضوئي انهياري يعمل بنمط جيجر والذي هو قيد التطوير كما تمت مراجعته في الفقرة (٥,٢) [94]. بالإضافة إلى التصوير الحساس المقاد، فإن وضع مصفوفات العد الفوتوني نمط جيجر من شأنه أن يسهل تصوير المدى المباشر كنتيجة لخصائص التزامن الدقيق لانهيار نمط جيجر. إن تطوير مصادر ليزرية عالية القدرة بمجال البيكوثانية وذات الأحجام الصغيرة سوف يدفع باتجاه التقدم بتطوير نظمة التصوير التحكمي عالية الأداء. كما أُنشئ مؤخراً نظام ليزر مُصَغَّر، يُنتج نبضات ذات ٣٥ [µJ] وبطول موجي ١٥٣٧ [µm] و بزمن بقاء نبضة ١٩٠ بيكوثانية (FWHM) و بمعدل ترددي ٦ [KHz]، تم توصيفه في المرجع [98].

### (٥,٤) قياس موضع الشعاع الضوئي باستخدام كاشف حساس الموضع (PSD)
### Light Beam Position Measurement Using Position Sensitive Detector

إن مصطلح (PSD) التمثيلي هو حساس موضع الشعاع الضوئي، يستخدم على سبيل المثال، الديود الضوئي ذا الأثر الجانبي (LEP) مما يوفر بيانات مستمرة عن الموقع بدقة عالية وباستجابة سريعة. يمكن تقسيم (LEP) إلى أنواع ببعد واحد أو بُعدين. تمايز الموضع هو الحد الأدنى لتحسس إزاحة بقعة الضوء الممكن تبيانها بالمسافة على سطح الحساس الضوئي. ويمكن للقيمة العددية للتمايز أن تكون، على سبيل المثال ١/١٠٠٠٠، (الدقة ١ميكرومتر و طول الكاشف١٠ميلي متر) يكون تمايز الوضع الضوئي في الهواء المحيط الخارجي محدودا باضطراب الغلاف الجوي. ينتج الديود ذو الأثر الجانبي (LEP) تيارين (1D) أو أربعة تيارات (2D) تتناسب مع الموضع النسبي لبقعة الضوء الساقط. يحسب موضع البقعة من الفرق في مقدار التيارات كما هو موضح في الشكل رقم (٥,١٢).




**الشكل رقم (٥,١٢). مبدأ عمل الديود الضوئي ذي الأثر الجانبي LEP ثنائي الأبعاد.**

عندما تسقط بقعة ضوء على سطح كاشف، فإن التيار من كل مصعد يتناسب مع الموقع النسبي للبقعة وإذا كانت البقعة، في المركز فإن التيارات تكون متساوية. وعندما تتحرك بقعة الضوء، فإن تغير التيارات الخارجة يسمح بحساب الإزاحة من العلاقة المعطاة في الشكل رقم (٥,١٢) حيث $i_d$، و $i_b$، و $i_c$ ، و $i_a$ هي متوسط التيارات للتلامسات a, b, c, d و الطول الجانبي من المساحة الفعالة للكاشف هو d . الإحداثيات التي يقدمها LEP هي مركز كتلة الأشعة ضوئية. الديود الضوئي ذو الأثر الجانبي LEP يوفر دالة تحويل خطي ويمكن استخدامه كأداة استشعار ضوئية خطية للإزاحة أو للزاوية.

على سبيل المثال في حالة قياس حزمة شعاع منعكس المبين في الشكلين رقمي (٥,٣ و ٥,٢)، فإن الإزاحة الجانبية للعاكس ($\Delta Y$ ، $\Delta X$) عن مركز مجال القياس هي [99] .

$$\Delta Y = \left(\frac{d}{2}\right)\left(\frac{L}{f_e}\right)\left[\frac{i_a - i_c}{i_a + i_c}\right]$$

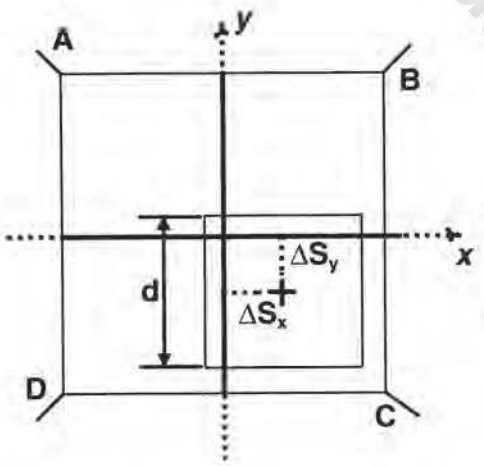
(٥,١١)

$$\Delta X = \left(\frac{d}{2}\right)\left(\frac{L}{f_e}\right)\left[\frac{(i_b - i_d)}{(i_b + i_d)}\right]$$

حيث L هي المسافة إلى الهدف و $f_e$ هو البعد المحرقي الفعال للمستقبل الضوئي. محددات الأداء الهامة هي الموضع و التمايز، والخطية وقياس مجال الرؤيا (MFOV)، التي ينبغي أن تُحَسَّن في حساب الإشعاع الخلفي.

$$MFOV = d/f_e \qquad (٥,١٢)$$

عادة ما يكون لديودات الأثر الجانبي الضوئية LEPs المتوفرة تجاريا مساحة مربعة فعالة بطول جانبي ١٠-١ ميليمتر ومعظمها من السليكون باستجابة طيفية من ٤٠٠-١١٠٠ نانومتر.




كاشف الحساس الموضعي الرباعي 4Q

$$\Delta S_x = \frac{d}{2}\frac{(i_B + i_C) - (i_A + i_D)}{i_A + i_B + i_C + i_D}$$

$$\Delta S_y = \frac{d}{2}\frac{(i_A + i_B) - (i_C + i_D)}{i_A + i_B + i_C + i_D}$$

**الشكل رقم (٥,١٣). مبدأ تشغيل كاشف حساس الموضع الرباعي (4Q).**

نوع تمثيلي آخر من الكاشف الحساس للموضع PSD يسمى الكاشف الرباعي (4Q) يتكون من أربعة ديودات ضوئية منفصلة كل واحد منها يملأ مربعاً من المربعات المصورة في الشكل رقم (٥,١٣) يعطي الكاشف الحساس للموضع الرباعي 4Q PSD أيضاً أربعة تيارات لحساب موضع الحزمة إلا أن سيئته تكمن في خطيته غير الكفوءة وفي شرط بأن تغطي الأشعة جزئيا كل واحد من الديودات.

تفضل الديودات الكاشفة للموضع التناظرية PSDs في قياسات السرعات العالية وبوجود إشعاعات خلفية عالية. يعطي تصميم ومبدأ تشغيل الـPSDs البسيط مزايا في الاستقرار والوثوقية. الإلكترونيات اللازمة لمعالجة إشارة الخرج التناظرية (التمثيلية) هي بسيطة للغاية وقابلة للتنفيذ بتكلفة منخفضة. دقة الموضع بحدود ٠,١ ٪ قابلة للتحقيق و مجال السعة الديناميكي يفوق عدة ديكادات. لتجنب ، على سبيل المثال، التداخل مع الضوء الشارد، هناك طريقة معيارية لمعالجة الإشارة ممكن استخدامها بسهولة مثل استخدام الضوء المُعدّل .

بدائل عن أجهزة الكشف التناظرية هي الكواشف المصفوفية (CCD وCMOS). كل من الكواشف الحساسة للموقع التناظرية (التماثلية) PSDs و الكواشف المصفوفية (CCD وCMOS) على حد سواء ذات قدرة على كشف الضوء إلا أنهما يعملان بطرق مختلفة. مخرج الـ PSD هو تابع لمركز ثقل التوزع الكمي للضوء الكلي على المنطقة الفعالة. أما خرج كاشف المصفوفة فهو القيمة العظمى لشدة الضوء على المنطقة الفعالة لكل بكسل وبالتالي يصف صورة. تُقْرأ شدة بكسل الـ CCD بشكل تسلسلي، سطرا بسطر. تعطي مصفوفة الـ CMOS شدة كل بكسل بالنمط التفرعي (التوازي).

الـ CCD هو جهاز مؤلف من مصفوفة ثنائيات (ديودات) MOS متقاربة. حيث يُسَجل الضوء كشحنة كهربائية في كل ثنائي. ممكن أن تُنقَل الشحنات المجمعة بنمط

تسلسلي لخرج الجهاز المحكوم بنبضات ساعة متتابعة. يعطي الـ CCD خرجاً رقمياً. لا يتمكن الـ CCD من قياس مركز ثقل بقعة الضوء من دون معالجة إشارة رقمية إضافية. أخذ العينات والمعالجة الرقمية تجعل الـ CCD أبطأ من كاشف حساس الموقع PSD. ومع ذلك ، من أجل الوصول إلى أقصى دقة و أعلى تمايز يجب عمل استيفاء بين البقع الضوئية (pixels) المتجاورة. تمثل المسافة بين كل بقعتين ضوئيتين متجاورتين الحد الأدنى لحجم البقعة. المجال الديناميكي للـCCD محدود ويمكن أن تعطي إزاحة مفاجئة في شدة الضوء زيادة ظهور التبقع. تتغلب مصفوفات الـ CMOS على الكثير من نقاط ضعف الـ CCDs عندما يتعلق الأمر بالمجال الديناميكي والسرعة.

يكمن ضعف كاشف حساس الموقع التمثيلي PSD بأنه لا يمكنه التفريق بين العديد من الحزم. يكون مخرج هذا الكاشف مركز ثقل الإنارة الكلية. يعطي استخدام مصفوفة إمكانية للتفريق بين حزمتين مختلفتين عن طريق تقييم قوة إشارة بقع الضوء. كما يتبين من السابق فإن أسرع وسيلة لقياس الموضع وسط بقعة ضوء هو استخدام كاشف حساس الموضع التناظري. الذي يمكن استخدامه بفعالية في نظام المحاذاة حيث يتم قياس موضع شعاع ليزري مرجعي. مثل هذه النظم ممكن استخدامها في التطبيقات المتعددة المحاذاة، من الجسور إلى أنظمة التدريب على إطلاق النار الضوئي.

تستخدم PSDs على نطاق واسع في حساسات الإزاحة باستخدام التثليث. يمكن أن يُصنَّع مثل هذا النظام بتكلفة منخفضة باستخدام الكترونيات بسيطة. السيئة هي في الحالة التي يتم عندها اختراق الضوء لجسم مسامي مثل الورق، عندها يمكن أن يسبب السطح الذي يتم قياسه، تغيرات كبيرة في القيم المقاسة. كما يجوز أن يشوه سطح النسيج شكل بقعة الضوء المستخدمة في القياسات. وهذا يمكن أن يحدث انحرافاً في مركز ثقل بقعة الضوء المستخدمة في القياسات وبالتالي إلى جانب كاشف حساس الموقع. باستخدام معالجة ضوئية متطورة للإشارة مثل الترشيح الضوئي إلى جانب الكشف

المتزامن مع كاشف حساس الموقع يمكن أن تحل المهام الصعبة مثل قياسات إزاحة الحديد الساخن أو أخذ قياسات داخل قوس شعلة اللحام.

إن كاميرا المسح الخطي هي جهاز التقاط الصور لها حساس CCD ومُشَكَّلة من خط واحد من العناصر الحساسة للضوء (pixels). لذلك، على عكس الحساسات السطحية التي تولد إطارات، يتم في هذه الحالة التقاط الصور سطرا بسطر. يمكن اعتبار خط المسح الواحد كرسم ببعد واحد لسطوع الخط المُراقب في المستويات الرمادية (على سبيل المثال، ٠-٢٥٥ مستوى). إن تغييراً مفاجئاً في مستوى اللون الرمادي عند نقطة واحدة يقابل إما نقطة على حافة العنصر أو أي تباين لمواصفات الصورة الملتقطة. يسمح الكشف عن هذا التغيير بقياس دقيق، بفضل التمايز العالي للحساسات الخطية التي هي أفضل بكثير من تمايز تصوير مساحة. على سبيل المثال، فباستخدام الضوء الخلفي، يمكن كشف موضع وعرض شريط أو شوائب (ثقوب، و خدوش، و بقع، الخ) على السطح المفحوص.

نظام الاستشعار الخطي له سرعة عالية وتمايز عال. تمايز كاميرا المسح الخطي أكبر بـ ١٠ مرات من كاميرات المسح السطحي و يمكن عادة أن تمسح عند الـ ٢٠ ميغاهرتز (٠,٢٦ميلي ثانية/٥١٢٠ خط بكسل) مقارنة بـ ١٠ميغاهرتز (٢٦,٢ ميلي ثانية/٥١٢× ٥١٢ وصورة) لكاميرا مسح مساحة. عند فحص جسم متحرك باستمرار مثل الصفحة تتم معالجة الاشارة بسهولة بواسطة الكاميرا الخطية بسبب مخرج الفيديو الخاص بها عند كل مسح. تحتاج كاميرا المساحة لتزامن مناسب. يكون التركيز في هذا الكتاب على استخدام الديود الضوئي ذي الأثر الجانبي LEP فيما يتعلق بالتطبيقات الفقرات (٥,٥,٥ و ٥,٥,٦) لقياس الموضع بالشعاع الضوئي.

### (٥,٤,١) التمايز والاضطراب Resolution and Turbulence

يمكن استخدام الـ PSD في التطبيقات العملية بطريقتين مختلفتين لقياس موضع أو اتجاه شعاع. يَستَخدم حساس الشعاع المباشر شعاعاً ضيقاً يصدم السطح الفعال لكاشف حساس الموضع PSD ويَستَخدم حساس الشعاع المنعكس شعاع زاوية واسعا لإضاءة الهدف والعاكس الذي فوقه. يمكن أن يكون العاكس عبارة عن منشور مكعب زاوي أو صفيحة عاكسة. يُهَيمن عملياً الضوء المنعكس من العاكس على الإشارة العائدة الى المُستقبِل. يُركّز الضوء على سطح كاشف حساس الموضع PSD من قِبَل عدسة موجبة موضوعة قبل الكاشف. يُعطي موضع نقطة التركيز اتجاه شعاع حزمة الضوء مُقارنةً مع العاكس. إذا كان العاكس في منتصف الحزمة فإن الضوء المنعكس مركز على منتصف سطح كاشف حساس الموضع الفعال. إذا مُسِحَت الحزمة، فإن بقعة الضوء على كاشف حساس الموضع PSD تمسح بشكل مماثل. تَقيسُ المسافةُ الحركةً الحقيقيةً لبقعة الضوء على كاشف حساس الموضع PSD. مُثِّل التحسس المباشر في الشكل رقم (٥,١) و شعاع الاستشعار المنعكس في الشكل رقم (٥,٢).

يعتمد التمايز في الكاشف PSD على سعة الإشارة. وقد قام عدة مؤلفين بتحليل دقة اكتشاف الإشارة وآخرهم دوناتي Donati وآخرون [100]. يُحدِّد ضجيج الطلقة القائم على الإشارة (المدى الكمي) المدى المطلق للتمايز. و يتناسب عكسيا مع عدد الفوتونات المكتشفة أو بشكل أدق مع الجذر التربيعي لعدد الإلكترونات الفوتونية (Nph) المستخدمة في عملية القياس.($\sim 1/\sqrt{N_{ph}}$) في الحالة الحقيقية. يُهيمن عادة كاشف تيار الظلام ومضخم الضجيج الأولي مع الأخذ بعين الاعتبار الإشارة المعتمدة على ضجيج الكم. ويطلق الطول المميز Lc على عامل آخر الذي يمثل إما البعد، أو القطر أو الوقت اللازم لمعالجة الإشارات. و كلما زاد الطول المميز كبر الضجيج (σ)

$$\sigma = L_c/N_{ph}. \quad (٥,١٣)$$

الطول المميز لكاشف حساس الموضع التماثلي هو قطر بقعة الضوء (w) على سطح الكاشف. ويمكن استخدامه لحساب دقة قياس الموضع ( $\sigma_x$،$\sigma_y$)، كما رأينا في (٥,١٤).

$$\sigma_x , \sigma_y = (\pi/2)^{1/2}(kw/SNR), \quad (٥,١٤)$$

حيث k هو ثابت يحسب من محددات الضجيج كاشف حساس الموضع و SNR هو النسبة بين القيمة الفعالة للإشارة و تيارات الضجيج [100]. إذا استخدمت طريقة الشعاع المنعكس فإن عرض الشعاع على سطح الكاشف يتحدد من MFOV، كما تم تبيانه في (٥,١٢). يتم تحديد الطول المميز لأنظمة القياس المختلفة من مبدأ القياس أي، أجل محدد المدى النبضي TOF هو الوقت اللازم لتحديد وقت الإيقاف ومن أجل التثليث فهو الشك في قياس الزاوية [100].

وقد تم قياس وتحليل الاضطراب في الغلاف الجوي من قبل " Mäkynen" وآخرون [99 ، 101 ، 102]. ومؤخرا يشار في [103] إلى إن اضطراب الغلاف الجوي يسبب ظاهرة يشار إليها بشكل شائع على أنها هيمان الشعاع على وجهه،وومضان وتنفس الشعاع scintillation، وفقاً للتأثير الناتج على بقعة الشعاع كما يُرى على الشاشة بعد الانتقال خلال الجو المضطرب. المقصود بهيمان الشعاع على وجهه عشوائية التغيرات في موضع بقعة الشعاع على الشاشة. تكون تقلبات ومضان الإضاءة داخل الشعاع و التوسع و الانكماش في تنفس الشعاع أبعد من توقع البعد بواسطة أبعاده و حيوده. سبب نشوء هذه الآثار انعدام التجانس في معامل انكسار الهواء الذي ينشأ أساسا من الاختلافات في درجة الحرارة المكانية داخل الغلاف الجوي. و التأثير المهيمن هو هيمان الشعاع على وجهه في الاضطرابات الضعيفة و الومضان في الاضطرابات القوية.

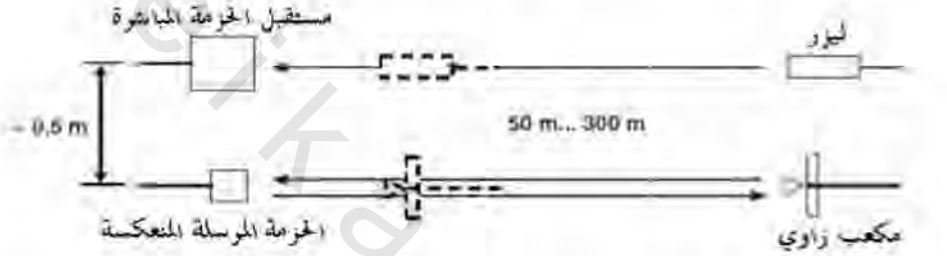
أثر الاضطراب في الغلاف الجوي على انتشار الشعاع هو نتيجة للظواهر المعقدة. مع ذلك في بعض الحالات، يمكن أن تكون القدرة على استخدام معادلات بسيطة أمرا مُرضيا. يمكن استخدام معادلات الهندسة الضوئية بنجاح للتنبؤ عن تأثيرات واسعة النطاق مثل تقلبات زاوية الوصول أو هيمان الشعاع على وجهه. يفترض مع ذلك، أن قطر الشعاع (w) لا يمكن أن يتغير تغيراً ملحوظاً بالجيود، أو بسبب التبعثر الناتج عن اضطراب الغلاف الجوي. يتحقق الشرط الأول إذا تم قياس المسافة (L) ضمن نطاق حيود فرينل Fresnel diffraction range $w > \sqrt{L\lambda}$ و الشرط الثاني أن يكون الاضطراب في تكامل المسار ضعيفاً (طول الترابط) $\rho_o > L\lambda/\omega$ [104].

توجد تطبيقات عديدة في الهواء الطلق والتي تتم فيها قياسات ضوئية تحت اضطرابات قوية في الغلاف الجوي. وتشمل هذه على سبيل المثال أشكالاً مختلفة لقياسات إزاحة الاستشعار عن بعد للمحاذاة القائمة على الليزر، و المسح، و المحاكاة الضوئية لإطلاق النار. عادة ماتتغير في هذه التطبيقات قياسات المسافة من عشرات الامتار إلى حوالي ١كم، و الدقة المطلوبة من ٠,٠١ إلى ٠,١ ميلي راديان المقابلة لبضعة ملليمترات لإزاحة على مسافة ١٠٠متر، على سبيل المثال. وأظهرت الحسابات التي أجريت في [99–105] أنه يمكن تحقيق مثل هذا المستوى من الدقة.

يختلف تأثير الاضطرابات عن بعضها البعض فيما لو استخدم مبدأ الشعاع المباشر أم الشعاع المنعكس. وكذلك الأمر بالنسبة لاستخدام مبدأ كاشف حساس الموضع، أو كاشف حساس الموضع الرباعي 4Q، حيث يمكن أن يكون له تأثير على النتيجة. الشكل رقم (٥,١٤) مبادئ ترتيب القياس من قبل Mäkynen [69، 105] للتحقق من الحسابات النظرية.

قريباً، أظهرت نتائج القياسات المعطاة باستخدام LEP ككاشف تمايزاً محدوداً بالاضطرابات التي تتغير من ٠,٣ إلى ٤,٥ ميليمتر عندما تزداد المسافة من ٥٠ إلى ٣٠٠ متر عند مستوى اضطراب متوسط وذلك من أجل قياس مباشر للأشعة، و كان التمايز بطريقة الشعاع المنعكس أسوأ نحو ٥٠ ٪ من مكعبات الزاوية كعاكس. وأعطت أجهزة

الكشف الرباعي (4Q) في شروط الهواء الطلق تمايزاً أسوأ بحوالي ١٠ مرات من الديود الضوئي ذي الأثر الجانبي LEP. ليست الشروط أعلاه تقييدية للغاية عند الأخذ بعين الاعتبار حساسات الشعاع المنعكس عملياً. يمكن أن تتدهور دقة محدد المدى الليزري النبضي TOF rangefinder إذا لم يؤخذ الاضطراب بالاعتبار وبعناية عند تصميم الجهاز إذ إن سعة الإشارة المستقبلة تتأثر بالتوهج.




**الشكل رقم (٥,١٤). قياسات اضطراب الغلاف الجوي في ترتيب الشعاع المباشر والشعاع المنعكس كدالة للمسافة.**

## (٥,٥) التطبيقات
## Applications

تهدف التطبيقات إلى قياس زمن انتقال نبضة الليزر وموضع شعاع الليزر العديد. سوف تُناقش فيما يلي بعض تطبيقات كاشف حساس الموضع التماثلي (PSD) وزمن الرحلة النبضي (LEP) التي تم تطويرها مؤخرا لقياس المسافة. البعض منها هو قيد التطوير في مختبرات البحث ولكن معظمها تم تسويقه.

### (٥,٥,١) تطبيقات مراقبة حركة المرور Traffic Control Applications

استُخدمت دوائر كهربائية حثية على نطاق واسع منذ سنوات في مجموعة تطبيقات متنوعة لمراقبة حركة المرور. ومع ذلك، قدمت التقنية الحديثة للقياس الضوئي الإلكتروني بديلاً مجدياً للغاية، ليس فقط فنيا ولكن أيضا بسعر منافس. لاستخدام

القياس الضوئي فوائد واضحة، أيضاً. ليس فقط بسبب بساطة التركيب والصيانة، ولكن أيضا لفتح إمكانيات جديدة. التطبيق الأسبق المعروف في صناعة الإلكترونيات الضوئية في حركة المرور كان رادار السرعة للمسافات الطويلة. وتطورت التقنية بسرعة منذ أن استخدمت الأجهزة الأولى و ربما تؤدي اليوم مقاييس محدد المدى الليزري إلى تقنية قياس السرعة.

حساسات قياس المسافة الليزرية المتكاملة الصغيرة تم تكييفها لتناسب الكثير من تطبيقات حركة المرور بشكل ملائم [106]، بما في ذلك:

١- تشغيل كاميرا المعتمد على قياس المسافة لنظام التعرف على اللوحة المعدنية (LPR).

٢- قياس سرعة السيارة وتشغيل الكاميرا المعتمدة على (LPR) في حالات انتهاك السرعة.

٣- قياس متوسط سرعة مركبة بين موقعين.

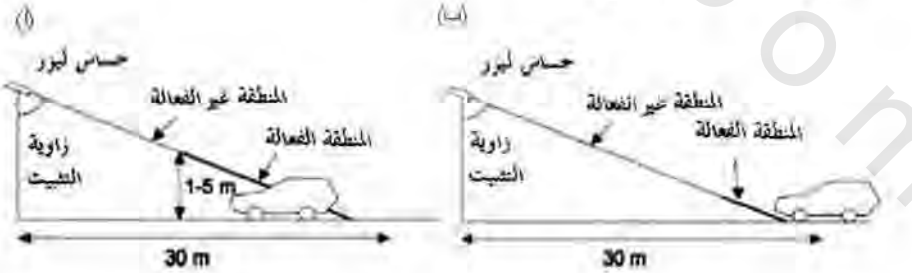
٤- تصنيف المركبات، وقياس الشكل الجانبي و الارتفاع و الطول.

٥- مسافة الأمان بين السيارات.

٦- مراقبة إشارة المرور الضوئية، وحساسات الدوران إلى اليسار.

٧- قياس السرعة بكاميرات قياس السرعة المحمولة.

٨- مدخل نفق التحكم، الخ .




**الشكل رقم (٥,١٥). (أ) مقياس السرعة و (ب) تشغيل الكاميرا المعتمد على LPR.**

يمكن في بعض الحالات استخدام معلومات المسافة الأساسية بشكل مباشر، و لكن تكون عادة معالجة بعض الإشارات ضرورية. يؤخذ في الغالب قياسات لآلاف المرات في الثانية، و يتطلب الكثير من القدرة لمعالجة الإشارة.

أحد تطبيقات محدد المدى الليزري النبضي TOF هو الكشف عن المركبات، عندما تكون المركبة متجهة نحو الكاميرا LPR. يمكن القيام بذلك أيضا من أجل المركبات المغادرة. مبدأ العملية هو قياس سريع للمسافة إلى العنصر واستخدام ذلك لتحديد لحظة التشغيل بدقة. تركيب أجهزة الاستشعار يكون عادة على ارتفاع من ٥-٧ متر فوق سطح الأرض توجه نحو الأمام و إلى الأسفل باتجاه الطريق. عندما تدخل المركبة منطقة التشغيل، التي تُعرِّفها المحددات، يُرسِل الحساس نبضة إلى الكاميرا. يجب أن تكون دقة التشغيل في مثل هذه الحالات عالية تصل إلى ٥-١٠ سنتمتر ( أو ميلي ثانية)، اعتمادا على التركيبة، التي في الشكل رقم (٥,١٥ ب). يمكن استخدام منشآت مماثلة لقياس سرعة اقتراب أو ابتعاد المركبات، الشكل رقم (٥,١٥ ب).

يجب أن يكون قياس السرعة سريعاً جداً و أن تكون المعلومات متاحة بعد تجاوز المركبة نقطة القياس٢٠-٣٠ ميلي ثانية. يجب أن تقاس السرعة ضمن نطاق من١٠-٢٥٠ كيلومتر في الساعة. لإعطاء معلومات السرعة الزائدة لتشغيل الكاميرا، ويمكن ترتيب القياس على مرحلتين. أولا ، حساب قيمة السرعة التقريبية، والتي تستخدم للتشغيل. و أن يتم ذلك في بضعة ميلي ثانية. بعد ذلك تجرى مزيد من المعالجات على الإشارة لإعطاء قيمة السرعة النهائية لنظام الكاميرا. مما يوفر قياساً موثوقا به، حتى ولو كانت المركبات تقاد بالقرب من بعضها البعض. كما يمكن استخدام المعلومات للتحكم بالمسافات بين المركبات أيضا. إمكانية القياس الدقيق للهدف هي واحدة من أفضل سمات المبدأ الضوئي الموضح، لأن قياس مجال الرؤيا

يمكن أن يعدل إلى قيم صغيرة حسب الحاجة. يكون لرادار الموجات الميكروية عادة حزمة قياس أكثر من ١٠°. وإذا وجدت أكثر من مركبة في مجال الرؤية فإن المستخدم في أغلب الأحيان لا يكون متأكداً من أي مركبة ستُكشَف.

يستخدم قياس المسافة السريع مع تقنية المسح الضوئي (رادار ليزري) في التطبيقات الصناعية للقياس الجانبي أو لحماية منطقة. في مراقبة حركة المرور، ممكن استخدام قياس سريع للمسافة من دون أي مسح ميكانيكي لتحديد الأشكال الجانبية للسيارة، لأن السيارة نفسها تتحرك. ويمكن أن يولد جهاز تحديد المدى السريع شكلاً جانبياً يمكن استخدامه فيما بعد لأغراض التصنيف. ومن ثم يمكن استخدام الجمع بين قياس سرعة المركبة وارتفاعها وطولها مع بيانات التشكيل الجانبي لمزيد من التحليل لنوع المركبة.

بديل هذا النوع من التطبيق هو استخدام كمرتين للمسح الخطي على جانبي الطريق. عندما تنتقل المركبة عبر خطوط المسح العمودية، تتشكل صورتان، يمكن أن تربط فيما بينها لتحديد سرعة المركبة. بالإضافة إلى السرعة، فإن النظام يكون قادراً على استخراج مجالٍ واسعٍ من المعلومات عن حركة المرور، من بين أمور أخرى مثل حجم المركبة، والتسارع و المسافات بين العربات. ويمكن لهذه التقنية قياس العديد من الممرات ولكن حركة المرور الثقيلة قد تؤدي إلى إنذار خاطئ [107].

محدد المدى الليزري هو أيضا خيارٌ جيدٌ لمراقبة التقاطع. ويمكن تركيب أجهزة مراقبة ممرات عديدة في مكان واحد لجعل التركيب والتشغيل أسهل. يمكن توجيه كل جهاز من أجهزة محدد المدى لقياس الممر الخاص به. كما يمكن استخدام الجهاز للكشف عن تغير إضاءة المركبة للتحقق من انتهاك الضوء الأحمر. شهدت العديد من الشركات المصنعة والمجمعة لنظام المراقبة مزايا محدد المدى الليزري في أنظمتهم. فسهولة التركيب،

وتعدد الوظائف، وسهولة الصيانة هي مزايا الحساسات الإلكترونية الضوئية التي تعتمد على تحديد المدى [106].

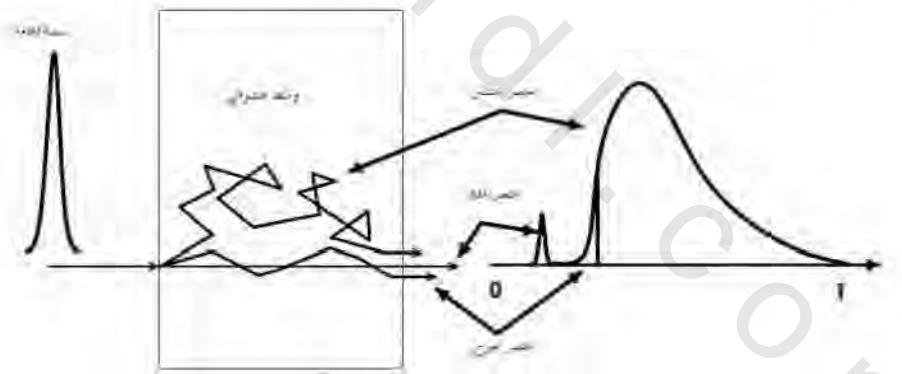
محدد المدى الليزري النموذجي للتطبيقات المرورية هو مانع المياه، وهو جهاز مملوء بالنيتروجين يسمح بقياس المسافة عن سطوح ضعيفة العاكسية عند سرعة عالية مع تمايز جيد جدا. يمكن استخدام الجهاز باستهلاك منخفض للطاقة في تركيب كل من الأنظمة الثابتة والمحمولة في درجات حرارة وبيئات مختلفة. إنه من الضروري أن يحقق جهاز الليزر في أي قياس يدخل فيه الناس معايير سلامة الليزر الدولية المناسبة. وهي تُحدِّدْ مستوى قدرة الليزر المستخدمة كما تُحدِّدْ بعض الحدود التقنية الأخرى. تُقسَّم معايير المنتجات إلى عدة فئات (درجات)، بدءاً من الفئة الأولى. المستوى المطلوب للسلامة في مجال مراقبة حركة المرور هو الفئة الأولى، حيث يكون القياس آمنا على العين. بسبب ارتفاع القيود المفروضة على الفئة الأولى يجب على التقنية أن تُحسَّن لتسمح بقياسات فعالة.

### (٥,٥,٢) التطبيقات الطبية Medical Applications

عندما تضاء مادة عكرة بواسطة نبضة ليزرية قصيرة فإنها تنتشر مؤقتاً و تظهر ثلاثة أنواع من الفوتونات تنتقل عبر المادة وهي : قذفية، وتعرجية وانتشارية، موضحة في الشكل رقم (٥,١٦) يكون الزمن العابر بالنسبة للفوتونات القذفية أقصر و للفوتونات الانتشارية أطول. ويطلق على هذه الظاهرة هجرة الفوتون. ينتقل الضوء في كل حالة مسافات مختلفة خلال الوسط، ويعتمد زمن رحلته على المسافة المقطوعة ومعامل انكسار الوسط.

كل من الفوتونات غير المبعثرة والفوتونات التي تجتاز التشتت بخطوة منفردة موجهة إلى الأمام تسهم في مركّبة كثافة العناصر القذفية (مكوَّنة من فوتونات تنتقل

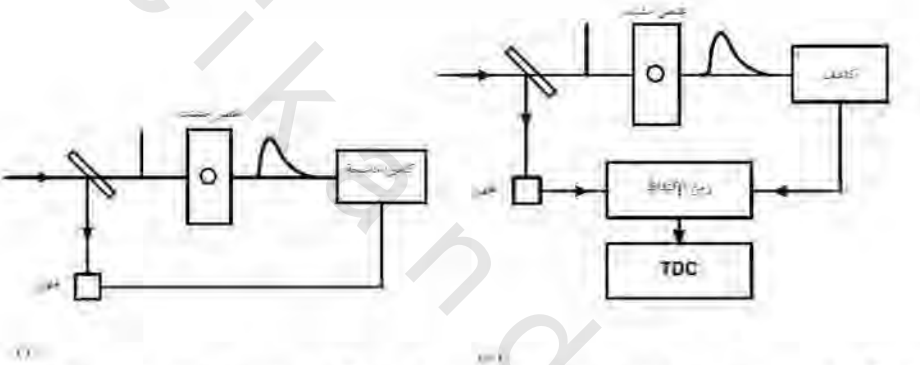
بخطوط مستقيمة على طول شعاع الليزر). تخضع هذه المركبة لتخامد أسي مع زيادة سماكة العينة. مجموعة الفوتونات الثعبانية ذات المسارات المتعرجة هي فوتونات تعرَّض كل منها لعدد قليل من الاصطدامات. وهي تنتشر على طول مسارات متعرجة الشكل والتي تنحرف قليلا فقط عن اتجاه الشعاع الساقط و تُشكِّل الجزء الأول الواصل لعنصر الانتشار. تحمل هذه الفوتونات معلومات عن الخواص الضوئية للوسط العشوائي ومحددات لأي جسم غريب قد يحدث أن تعترضها خلال تقدمها. العنصر الناشر هو واسع جداً ومكثف لما يحتوي على مجموعة من الفوتونات القادمة بعد أن كانت قد اشتركت بأعمال تشتت عديدة؛ ولذلك هاجرت في اتجاهات مختلفة و بمسارات مختلفة الأطوال. وعلاوة على ذلك، يحمل عنصر النشر معلومات عن الخصائص الضوئية لوسط التشتت ويمكن أن يعكس تشوهه لوجود عدم تجانس موضعي في الوسط [108].




الشكل رقم (٥,١٦). انتشار نبضة ضوئية خلال وسط عشوائي تنتشر إلى عناصر قذفية و تعرجية و انتشارية.

يمكن دراسة هجرة الفوتون باستخدام كاميرا ماسحة streak camera. تقيس شكل النبضة لنبضة ليزرية قصيرة تنتقل خلال العنصر المشتت للضوء وبدقة البيكو ثانية. في الشكل رقم (٥,١٧ أ) طريقة أخرى هي استخدام طريقة زمن الرحلة (نبضية

أو انزياح الطور) باستخدام تقنية مماثلة لتلك المستخدمة في قياس المسافة، كما هو مبين في الشكل رقم (٥,١٧ ب). تستطيع الكاميرا الماسحة قياس توزع طول المسار وإيجاد مجال طول مسار الفوتونات الوسطي. إذا تم استكشاف الفوتونات المنعكسة كدالة للزمن (التصوير التحكمي، انظر الفقرة ٥,٣)، فإنه يمكن أن يتحقق التصوير خلال وسط عكر.




الشكل رقم (٥,١٧). مخططات نموذجية لقياسات هجرة الفوتون (أ) كاميرا ماسحة ، و (ب) محدد المدى .

يستخدم النقل المميز بالزمن Time-resolved transmission في التطبيقات الطبية، على سبيل المثال، للكشف عن سرطان الثدي. يكون مبدأ القياس مماثلا لذلك المستخدم في الرادار الليزري في الفقرة (٥,٢) عادة ما تكون مصادر الضوء والكواشف جديلة ذيل من الألياف البصرية fiber pigtailed . لتحسين القياس يمكن استخدام مصادر ضوء بأطوال موجية مختلفة. وتستند هذه التقنية على الخصائص الضوئية غير المتكافئة للأنسجة السرطانية مقارنة مع الأنسجة الطبيعية. تكون التغيرات في الخصائص الضوئية لمجموعة نسج الثدي الطبيعية محدودة بأداء هذه الآليات [109، 110].

أول تقديم كان في أواخر عام ١٩٨٠ ، ازداد منذ ذلك الحين تطوير طرق هجرة الفوتون للكشف عن سرطان الثدي بشكل مطرد. وهي مثل تصوير الثدي بالأشعة السينية، وتقنية فحص الثدي بالأشعة الضوئية في أنها غير جراحية، ولكن من دون المخاطر المحتملة من استخدام الإشعاع المؤين. ومع ذلك فمن الواضح، أن التمايز المكاني للصور الضوئية يكون أدنى من ذلك المكتسب من الأشعة السينية بسبب التشتت القوي عند الأطوال الموجية الضوئية. بالمقابل، لتصوير الثدي بالأشعة الضوئية تكمن إمكانات كبيرة في التصوير الوظيفي، الذي يوفر معلومات فسيولوجية بواسطة التحليل الطيفي الكمي للمحددات مثل مكونات الأنسجة والأوكسجين. يكون عادة الطول الموجي المستخدم في المجال الموجي للأشعة القريبة من تحت الحمراء (NIR)، حيث ينخفض امتصاص الأنسجة نسبياً وبالتالي قياسات النفاذية ممكنة. وقد تم بالفعل بناء العديد من أجهزة فحص الثدي بالأشعة الضوئية [111].

التصوير المقطعي باستخدام الضوء المترابط Optical coherence tomography (OCT)، كطريقة قياس التداخل، تمّت دراسته بشكل مُكثّف من أجل التطبيقات الطبية أيضاً. التطبيقات الأولى ذات الصلة كانت تتعلق بتقييم مقطع الأنسجة البيولوجية لشبكية العين. كما تزايدت اختبارات الجلد منذ استخدام أدوات التنظيف لزيادة عمق الاختراق [112].

**(٥,٥,٣) التطبيقات الصناعية Industrial Applications**

بالإضافة إلى الخصائص الضوئية للورق يمكن استخدام الطرق الضوئية في عمليات تصنيع الورق لدراسة إتّساق لباب الورق، دقة المحتوى و محتوى الحشوة، والسمك، والكثافة الكتلية و الكثافة و مسامية الورق. ستعرض هنا فقط التحقيقات الجارية لاختبار خصائص الورق عن طريق هجرة الفوتون. كما أن الورق مادة معقدة يتم قياس معظم خصائصه باختبار موحد مرتبط، ولكن ليس بالضرورة أن يكون قياس الخصائص المطلوبة دقيقاً. على سبيل المثال، يتم استخدام قياسات تدفق الهواء لقياس خشونة سطح الورق.

يتمثل أحد النهج لفحص الورقة ضوئياً في التحليل الطيفي بالتمييز الزمني. لكي نكون قادرين على استخدامها يجب أن تكون المعرفة الأساسية لهجرة الفوتون في الورق معلومة. هل يمكن قياس سماكة الورقة، و الكثافة الكتلية والبنية التركيبية؟ و هل يمكن أن يتم ذلك من خلال دراسة هجرة الفوتون على سبيل المثال، خاصية مسامية الورق معقدة. و إذا اعتبر أن المسامية هي عبارة عن الحجم النسبي للمسام أو للهواء قد يمكن استخدام الصيغة التالية :

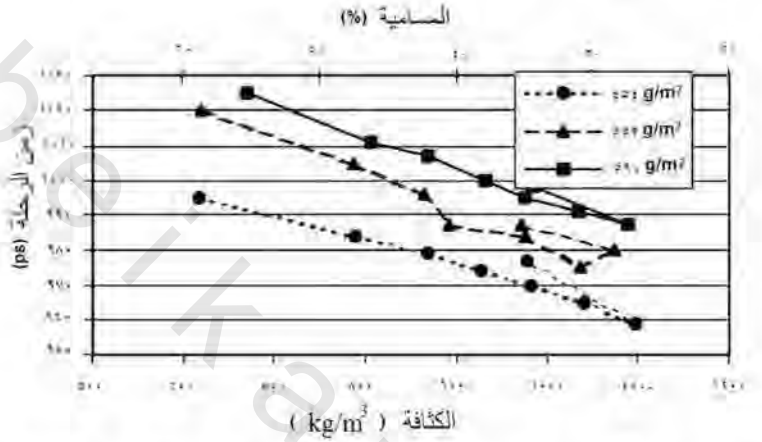
$$\varphi = (V - V_f)/V = 1 - \rho/\rho_f, \quad (٥,١٥)$$

حيث $\varphi$، المسامية ؛ V، حجم الورقة ؛ Vf ،حجم الألياف ؛ $\rho$ ، كثافة الورقة ؛ $\rho_f$، كثافة الألياف١٥٠٠ (كيلو جرام/متر$^3$) للألياف السليلوزية المثالية. ومرة أخرى ولأن سطح الورقة ليس صافياً فإن هذه التعاريف ليست دقيقة إلى حد ما. الناس المهتمون بقابلية الطباعة لهم تعريفهم ومقياسهم الخاص للمسامية. إذا ما نفخ هواء خلال ورقة ما و تم قياس التدفق عليها فإن ذلك يعتمد على كمية وحجم المسام خلال الورقة، وهذا يعطي بالتالي تقديراً لمدى اختراق الحبر للمسام [113]. تتألف الورقة ضوئياً من عدد كبير من الجزيئات الفردية المعبأة بشكل وثيق، التي شكلها ومعامل انكسارها يختلف اعتمادا على ما إذا كانت أليافا، أو حبيبات ليفية fines، أو حشوا. حيث إن الحبيبات الليفية هي أجزاء من الألياف، لديها نفس معامل انكسار الألياف المصنوعة جزئيا منها. ومع ذلك ، فإن الحبيبات الليفية لها مقطع عرضي مُشتّت أكبر نسبياً من الألياف غير المكسرة.

وصّف كارلسون وآخرون Carlsson [88] طريقة للتسجيل المميز زمنياً time-resolved لتشتت الضوء مع كاميرا ماسحة في وسط رقيق عالي التشتيت. ولقد طُبقت الطريقة على الورق. وبعدها قاموا بدراسة اعتماد تشتت الضوء على الكثافة الكتلية والكثافة.

يمكن أن تستخدم طريقة زمن الرحلة لفحص الورق بطريقة مشابهة لما وضّح في الفقرة (٥,٥,٢) ممكن تعديل المسامية ($\varphi$)، والكثافة ($\rho$)، وسمك الورق عن طريق

الضغط على صفيحة ورقية. يظهر الشكل رقم (٥,١٨) نتائج قياس هجرة الفوتون في ورقة مضغوطة قام بها Saarela [113].




الشكل رقم (٥,١٨). قُدِّم زمن الرحلة كدالة في المسامية والكثافة. وقيس التأخير بواسطة جهاز محدد المدى المُعدَّل. طول موجة الليزر ٦٥٠ نانومتر [113].

ضُغِطَت العينات الورقية بين لوحين زجاجيين قاسيين لضبط السمك خلال دورة القياس لتغيير الكثافة. علاوة على ذلك، تم تعريف المسامية على أنها حجم الهواء في ورقة، وأظهرت النتائج أن قياسات الليزر النبضي TOF يمكن أن تستخدم كمقياس لمسامية الورق. وصف مفصل للتجربة يمكن الاطلاع عليه في [114].

أظهرت النتائج أن ضغط الورق يؤدي إلى انخفاض مماثل في الـ TOF. هذا يشير إلى نقصان المسافة بين مقاطع التشتت للألياف. ومع ذلك، إذا كان الوزن الأساسي (الكتلة في وحدة المساحة) أقل من ٢٠٠ [$gm^{-2}$]، فإن للضغط تأثيرا ضعيفا على زمن الرحلة، وعلاوة على ذلك، فقد بينت النتائج أنه يمكن استخدام TOF الليزرالنبضي

لقياس المسامية في الورق. ومع ذلك، يتطلب هذا دراسة تأثير الحبيبات الليفية والألياف المعالجة.

أنجز كاربينين Karppinen وآخرون [115] دراسة متصلة بالموضوع على خصائص صناعة الورق ولبّة باستخدام قياسات زمن الرحلة (TOF). كانت عينات اللب التي تم اختبارها ذات اتساق منخفض، وكانت القيمة القصوى ٠,٦ ٪. وخلصوا إلى أن تقنية القياس TOF هي الأنسب لقياس محتوى الحبيبات الليفية.

للرادار الليزري Laser radar العديد من التطبيقات الصناعية الأخرى. يظهر أحد هذه التطبيقات في الشكل رقم (٥,٩ أ). هذا التطبيق يُعنى بفحص سمك البطانات المقاومة للحرارة الساخنة في أشغال الفولاذ الصلب. حيث تكون درجة حرارة البطانة خلال القياس مرتفعة، وتتراوح عادة ما بين و ١١٠٠ C° -١٤٠٠، والتي يمكن أن تُحْدث إشعاعات خلفية عديدة و مشاكل ضجيج. تُظهر هذه القياسات أنه من الممكن استخدام تقنية الرادار الليزري النبضي في تطبيقات القياس ذات المتطلبات العالية من هذا النوع للحصول على بيانات موثوق بها عن معدل اهتراء البطانة للمحولات الساخنة في أعمال الفولاذ الصلب [85].

يمكن أن يستخدم OCT أيضا لدراسة بنية الورقة بالتصوير المسحي tomographically [76]. عادة ما يكون سمك الورقة ١٠٠ ميكرومتر. يمكن استخدام الـ OCT فقط بالقرب من السطح، و يمكن باستخدام سوائل تطهير زيادة عمق القياس. يمكن استخدام قياسات هذه التقنية لدراسة احتراق السائل في الورقة [116]. تم تطوير تقنية OCT لقياس الأنسجة البشرية. ومع ذلك، فقد وجد في الآونة الأخيرة العديد من التطبيقات الصناعية (117) لحساسات الألياف الضوئية Optical fiber sensors.

تكمن نقاط قوتها في العديد من الأدوار الهامة الأساسية والتطبيقية في: تحملها لدرجات الحرارة المرتفعة، والبيئات القاسية والتداخل الكهرومغناطيسي. كما أن العمر الطويل و المرونة في الدمج والتصنيع يجعلها جذابة للتضمين في الهياكل العضوية (جسم الإنسان) وغير العضوية (الجسور والمباني والمركبات). القدرات المتنوعة لأجهزة الاستشعار الضوئي تجعلها بامتياز لأن تكون في شبكات الاستشعار.

يتم إضافة محزوز براغ Bragg في الألياف لتستخدم في قياس الإجهاد استنادا إلى تغير طول المحزوز. أي أنها تقيس إجهاد نقطة. يمكن استخدام الألياف الضوئية الطويلة كحساس للإجهاد من خلال قياس تغيرات طولها باستخدام مبدأ TOF. الإجهاد الكامل والإجهاد النقطي كلاهما مهم في العديد من التطبيقات. يمكن أن تدمج حساسات الألياف الضوئية خلال عملية تصنيع مادة مركبة لتحديد حالة الإجهاد في البنية. كأمثلة على مثل هذه التركيبات هي المواد المركبة من الألياف المدّعمة التي تستخدم بشكل متزايد في المواد الهندسية في الطائرات والمباني، والحاويات، وآلات الورق، وبناء السفن. غالبا ما تكون المواد المركبة مصممة لحمل أحمال ثقيلة وتستخدم في العديد من التراكيب الحرجة. تؤمن حساسات الألياف الضوئية المدمجة في المواد المركبة فرصة مناسبة للتحكم بسلوك هذه التراكيب. تكون حساسات الألياف الضوئية الحل الأمثل لقياس الإجهادات والحرارة داخل التراكيب التجميعية، لأن مادتهما غالبا ما تكون مطابقة للألياف المُدَعَّمة ولأن تأثيرها على قوة المادة مهمل لصغر حجمها [١١٨]. كمثال على هذه الهياكل نجد الأسطوانة المركبة الدوارة لماكينة الورق. التي تتطلب مراقبة حالة الأسطوانة خلال عملية تصنيع الورق. طرح في [119] نظام مراقبة الإجهاد عن بعد باستخدام حساسات الألياف الضوئية المدمجة خلال تصنيع المواد المركبة. مع ذلك، تخلق مراقبة الأسطوانات المركبة مشاكل حادة.

يمكن استخدام نقاط الإجهاد في رصد بعض نقاط المراقبة واستخدام الإجهاد المتكامل لرصد البناء كله. يبلغ الطول القياسي لمحزوز براغ عادة ١٠ (ملم). يمكن أن يكون أداء الهيكل مع توزع غير متجانس للإجهاد أكثر وثوقية بوجود حساس قياس الطول. يعمل دمج متكامل لنظام محزوز حيود براغ Bragg الليفي FGB ( Fiber Bragg Grating) مع نظام محلل الإجهاد المكامل الضوئي الليفي TOF fiber-optic integral على استخدام جيد لمزايا كلا النظامين. كما في حالة اتصال رادار ليزري مستوي محرقي، يمكن تطوير محول زمني إلى رقمي Converter TDC Time to Digital من أجل نبضات إيقاف متعددة، على سبيل المثال، المنعكسة من داخل الألياف FBGs . والذي هو الطريق لاستخدام ليف ضوئي واحد كشبكة حساسة من أجل كل من القياسات التكاملية والإجهاد لمثيل النقطة [120].

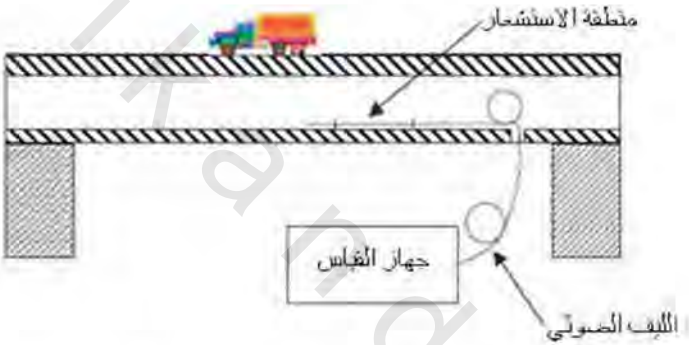
**(٥,٥,٤) مراقبة الجسور Monitoring of Bridges**

ينطبق حساس الألياف الضوئية على أساس TOF الليفي لقياس الطول ( Fiber optic sensor based on TOF) تماما على دراسة الأبنية الكبيرة مثل الجسور والسدود، حيث يجب أن تقاس كل من الإجهادات الديناميكية والساكنة وما ينتج عنها مثل الشقوق، والانحرافات والإزاحات في مواقع عديدة.

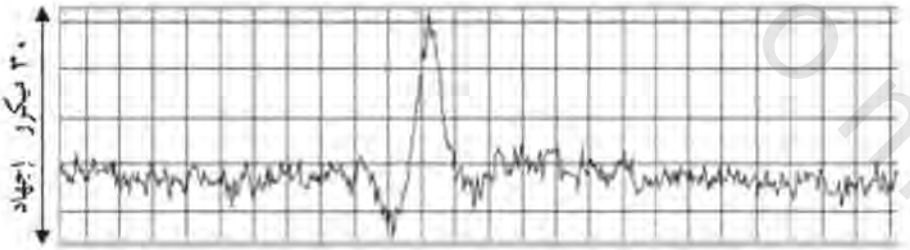
قياس الإجهاد الساكن و الديناميكي للجسر هام لمراقبة سلامته وجداول الإصلاح. وقد استُخدِم حساس الإجهاد الليفي الضوئي لزمن الرحلة في دراسة قياسات الإجهاد المتأثرة بحركة المرور للجسر [121]. تم تركيب الحساس في جسر قرب وسط نهر كما هو مبين في الشكل رقم (٥,١٩).

عندما تمر شاحنة فوق الجسر، يهتز الجسر صعودا وهبوطاً و يعاني البناء بين نقطتين محددتين لمنطقة التحسس بالتناوب من ضغط وتوتر. يظهر في الشكل رقم (٥,٢٠) واحد من نتائج الاختبار. تكون قيمة ذروة الإجهاد حوالي ٣٠ [μ strain].

يُقلِل ترشيح بيانات القياس من سعة الضجيج، ولكن ذلك يبطء سرعة القياس. يحقق النظام دقة أقل من ١ [μ strain] وذلك لأطوال تحسس تصل إلى ١٠متر بتردد قياس ١٠٠ هرتز. ممكن حساب سعة اهتزاز الجسر بواسطة الإجهاد المقاس والمحددات الفيزيائية للحساسات والجسر. تفيد هذه المعلومات في تقييم أداء الجسر و إنشاء نموذج تحليلي رياضي وتحليل الإجهاد.




**الشكل رقم (٥,١٩). مكان تركيب حساس الإجهاد الليفي الضوئي لمراقبة الإجهاد السطحي للجسر. ويبلغ طول منطقة الاستشعار ٢ متر ( بإذن من السيد ج. دوان G. Duan)**

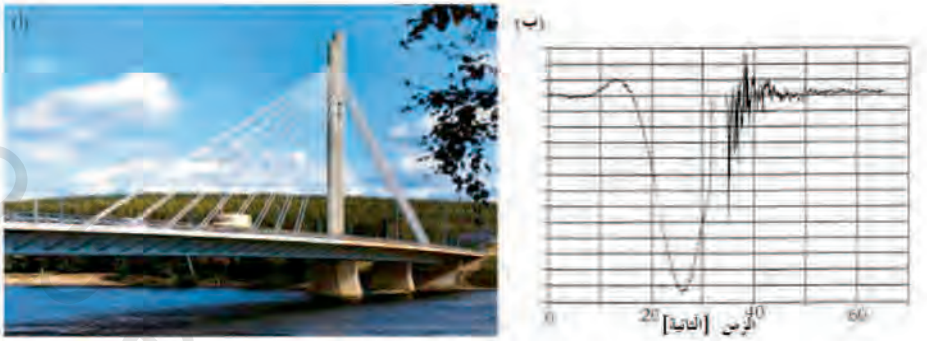



**الشكل رقم (٥,٢٠). قياس الإجهاد المتكامل لجسرعند عبور شاحنة عليه (ج. دوان G. Duan)**

PSD مع شعاع ليزر هو طريقة بديلة في قياس حركية الإنشاءات الكبرى مثل الجسور والأبراج والمباني والأعمدة، وحركة أجسام متحركة أخرى. يثبت الديودان الليزريان للمرسل وللمستقبل بحيث يُشكِّل شعاع الليزر خطا مرجعيا من جهاز الإرسال إلى وسط المنطقة المستهدفة المستقبلة. عندما يتحرك المستقبل نتيجة لحركة الجزء المتصل معه بالنسبة لخط الليزر المرجعي، يتغير تبعاً لذلك موضع شعاع الليزر على الهدف الضوئي. تقيس الإلكترونيات داخل المستقبل موضع نقطة مركز شعاع الليزر على الهدف الضوئي باستمرار وتنقل البيانات المتعلقة بإحداثياته x,y بشكل مستمر لجهاز كمبيوتر PC، كما يظهر على سبيل المثال في الشكل رقم (٥,٢١)

**الشكل رقم (٥,٢١). (أ) رسم تخطيطي (ب) صورة فوتوغرافية لنظام PSD و رأس ليزري لقياس حركة وسوية بناء (Noptel Oy).**

يبين الشكل رقم (٥,٢٢ أ) جسر كيميجوكي kiemjo في روفانيمي Rovanimi بفنلندا. باستخدام مبدأ القياس السابق لقياس منحنى أعلى برج الأسلاك في كلا الاتجاهين قيس انحراف السطح الرئيسي في الجزء الأوسط والتواء السطح الرئيسي. وأُجريت القياسات باستخدام مستقبل واحد في الجزء العلوي لبرج الأسلاك واثنين على السطح. تم تثبيت أجهزة الإرسال على أقدام ثابتة من برج الأسلاك لتجنب حركة الشعاع خلال القياس. كما وضِّحَ في الشكل رقم (٥,٢٢ ب) مثال على انحراف سطح.




**الشكل رقم (٥,٢٢). (أ) جسر (Kemijoki) و (ب) إنحراف السطح (مم) عندما عبرت الشاحنة موضع القياس**

تم تنفيذ التحميل باستخدام شاحنات مليئة بالرمل بوزن إجمالي قدره ٣٠ طن، وكان الغرض من ذلك مقارنة محددات التصميم والقيم مع تلك التي قيست في ظل ظروف حقيقية. عُرِض قياس إزاحة البناء (الجسر) مقارنةً مع قياس الإجهاد بالألياف الضوئية.

### (٥,٥,٥) قياس مسار السكة الحديد وإرشادات آلة الدك

**Railway Track Measuring and Guidance of the Tamping Machine**

يمكن استخدام كاشف حساس الموضع PSD للحصول على قراءة الإزاحة للعنصر المقاس نسبة إلى شعاع الليزر بدقة عالية. يشكل تفرق شعاع الليزر المتقارب والمنخفض خطاً مستقيماً بين نقطتين. يمكن لشعاع الليزر هذا أن يستخدم للمحاذاة أو تسوية مستوى المسارات، والخطوط الناقلة وغيرها. يثبت الـ PSD على العنصر ويضرب شعاع الليزر المنطقة الفعالة للـ PSD، كما وضِّح في الشكل رقم (٥,٢١) يمكن أن تكون المنطقة الفعالة أوسع باستخدام شاشة ناشرة PSD وعدسة فرينل Frensel. على سبيل المثال، يمكن أن نحصل على حساسية بمرتبة ٢٠٠ ميليمتر مع PSD بقطر ١٠ ميليمتر. غير أن هذا يقلل التمايز بحيث يصبح أسوأ بـ ٢٠ مرة مقارنة مع تمايز PSD.

يمكن تنفيذ القياسات باستخدام شكل هندسي عاكس، حيث يثبت العاكس إلى العنصر. يكون المرسل والمستقبل في نفس المكان الشكل رقم (٥,٢٣) . بسبب أن الضوء يقطع مجال الرحلة مرتين يسوء التمايز بنحو ٥٠٪ ،انظر الفقرة(٥,٤,١).

الشكل رقم (٥,٢٣). توجيه آلة التسوية. (أ) حزمة مباشرة ضيقة ، (ب) حزمة منعكسة بزاوية واسعة

أحد تطبيقات الـ PSD هو نظام قياس لتتبع آلية السكك الحديدية. يمكن استخدامه مع آلات تعبيد الطريق لقياس محاذاة القضبان وفقا لمبادئ توجيهية محددة [122]. يستخدم نظام مماثل أيضا مع العربات الثقيلة، والرافعات والعربات خفيفة الوزن لقياس الوضع العمودي والأفقي للقضبان.

يستخدم النظام جهاز قياس موضع ليزري للوصول لموضع السكك الحديدية في المستويات الأفقية والعمودية وذلك باستخدام جهاز استقبال موصول مع جزء من المركبة، التي هي على اتصال مباشر مع السكة. ويمكن تركيب هذا النظام في العديد من أنواع الآلات وهذا لا يتطلب لأتمتة إضافية. ويمكن أن يستخدم هذا النظام خلال عملية إعادة تأهيل أو قياس موضع السكك من أجل التخطيط لعمليات آلة التعبيد مقدما أو نتيجة لاختبار العمل بعد ذلك.

يسمح كمبيوتر للمشغل بمراقبة استقامة خط السكك الحديدية بشكل تصويري في كلا الاتجاهين، كما يتم تعيين قيم الرفع والمواءمة والتسوية و تخزين بيانات القياس

في ملف كما هو مطلوب. يُوجِّه المشغل، شعاع ليزر آمنا مرئيا إلى جهاز الاستقبال ويثبته في موضع ثابت. يميز المستقبل الشعاع الضوئي من على الهدف الضوئي ويقيس موضعه بدقة الميلي ثانية، الشكل رقم (٥,٢٣).

يُثَبَّت الليزر على مركبة في كلٍ من مبدأي القياس. عند استخدام شعاع ضيق يُثَبَّت المستقبل على آلة التعبيد وعند استخدام حزمة واسعة يتم وضع المستقبل على عربة الليزر و يُثَبَّت العاكس على آلة التعبيد. في حالة القياس بالانعكاس تكون المسافة ضرورية لتدريج النتيجة. تُوضع عربة الليزر عند نقطة ثابتة و تُثَبَّت على سكة مرجعية. ثم يتم ضبط الليزر ليصل إلى المستقبل أو العاكس على آلة التعبيد. يمكن التوصل إلى تماسك بيئي جيد بتعديل ملائم لحزمة الليزر ولتصميم البصريات ولتقنية الكشف الموظفة في المستقبل للحد من تأثير ضوء الشمس ودرجة الحرارة، و الضباب، و المطر، والثلج، وما إلى ذلك على دقة القياس على مدى واسع من نطاقات القياس.يمكن أن يكون المرسل على مسافة تصل إلى عدة مئات من الأمتار من المستقبل، اعتماداً على الظروف البيئية.

يستطيع هذا النوع من نظام القياس محاذاة خط سكة الحديد أفقياً ورأسياً في الأحوال الجوية الجيدة بمستوى دقة ميليمتر. يمكن أن تكون جولة القياس عادة ٥٠٠ متر. نظام الأشعة الانعكاسية واسعة الزاوية هو أبسط للتثبيت، لكن يجب تدريج القراءة مع البعد. يساعد هذا النوع من القياس على تعزيز العمل لضبط مسار السكك الحديدية بسرعة وبدقة مع موضع مرجعي. تُحسب قيم تصحيح المستوى والمحاذاة من الفرق بين الموضع الاسمي والفعلي. تُوجَّه نهاية الحبل الأمامية لآلة التعبيد بشكل آلي وتقاد وفقاً لقيم التصحيح.

**(٥,٥,٦) تدريب الرماية Marksmanship Training**

يمكن أن تستخدم طريقة PSD بالشعاع المنعكس للتدريب على إطلاق النار أيضاً. يصوِّب الهداف بندقيته إلى الهدف ويطلق النار. المعلومة الوحيدة المتروكة هي

حفرة على الهدف. من المهم في مجال التدريب تتبع الهدف قبل وبعد الضغط على الزناد. باستخدام عاكس على الهدف، ومصدر ضوئي لإلقاء الضوء على الهدف، و PSD مجهز بعدسة عند نفس محور جهاز الإرسال، يمكن تسجيل اتجاه الجهاز مقابل الهدف، الشكل رقم (٥,٢٤ أ) يُثبَّت الجهازعلى الأسلحة الرياضة وقبل ذلك يمكن أن تُحدد وتوجَّه إلى مسارها على سطح الهدف قبل وبعد الرمي. تترك كل تصويبة مسارا فريدا يوفر معلومات عن كيفية حدوث الرمي، الشكل رقم (٥,٢٤ ب)

يمكن أن تتحقق دقة من ٠,١ حلقة (وحدة المسافة ورياضة الرماية المستهدفة) في نطاقات الأماكن المغلقة في حالة ظروف مناخية جيدة أيضا في الهواء الطلق. يمكن تقييم درجة الصعوبة إلكترونياً لمسافات أقصر لتقريب المسافة العادية. وهذا يتيح تحليلا عميقا لمجريات تدريب الرماة. تتبع تنمية مهارة الرماية مبادئ صالحة عموما لتطوير أي مهارة. كما هو الحال مع أي مهارة أخرى ، فد يُعلَّم الرمي تدريجيا من المبادئ الأولى، ويُنتقل من البسيط إلى مهام أكثر تعقيداً .

الشكل رقم (٥,٢٤). (أ) جهاز قياس لنظام التدريب على الرماية. (ب) مسار توجيه البندقية على السطح المستهدف قبل وبعد الإطلاق. بإذن من (Courtesy of Noptel Oy).

يحتاج المتدرب [123] إلى:

١- التركيز على شيء واحد فقط عند تعلم مهارة معقدة.

٢- تكرار ما يكفي من التدريب والرمي الناجح لضمان أن يصبح الأداء تلقائيا قدر الامكان.

٣- وجوب أن تكون ردود الفعل مباشرة وفورية، ويفضل في الوقت الحقيقي، لجعل التعلم أكثر كفاءة.

٤- تطوير كل جوانب هذه المهارة ويجب القضاء على العوامل الخارجية المتداخلة إلى أقصى حد.

٥- حافز التدريب إذ إن نقص التحفيز يمكنه إفشال أكثر نظم التدريب تعقيداً.

تسمح تقنيات القياس المتطورة بتغذية راجعة في الفصول الدراسية وفي الظروف الحقلية. كما تسمح معدات التدريب باستخدام نظام ارتداد الفراغات الهوائية في سلاح المتدرب نفسه. ففي زيادة سلامة التدريب تنخفض الأعباء البيئية ويحفظ المال.

يتلقى الرامي على الفور، ردود فعل موضوعية من شاشة الكمبيوتر على الرمي، وذلك لإجراء التصحيحات اللازمة قبل الرمي التالي أو التسلسلي، مما يجعل عملية التدريب فعالة جدا. في الواقع، كلما كان الرامي سريعاً في تصحيح أي عادات سيئة للرمي، تعلم (أو تعلمت) تقنية الرمي الصحيح بشكل أسرع. يمكن أن تَؤدي التقنيات الخاطئة للكثير من العمل الإضافي ولزيادة في الوقت غير الضروري المصروف في سبيل أن يصبح الرامي ماهراً. يُمكّن هذا النوع المساعدات الضوئية من إجراء التحليل الدقيق الذي يمكن عمله لمهارة الرامي.

اعتبرت المعلومات المجمعة لردود الفعل هامة لتعلم المهارات الحركية. وهذا يعني استكمال المعلومات، التي تُقَدَّم كتغذية راجعة خارجية للمتعلم. وقد تبين أن نمط رد الفعل له تأثير على مهارة التعلم الحركي ، وخاصة في دراسات أجريت في إعدادات

المختبر. تطبيقات نظريات التعلم الحركي لتدريس مهام العالم الحقيقي، فعلى سبيل المثال، مهارات الرماية الرياضية هي الهدف النهائي لدراسات التعلم الحركي. ذكرت دراسة في [124] أن التغذية الراجعة من تسجيل الأهداف حسنت بشكل أساسي من الأهداف المسجلة للرماة المبتدئين خلال ١٢ أسبوعا من التدريب. كما أنه قد يكون هناك عدة متغيرات لا يمكن السيطرة عليها والتي قد تتداخل مع عملية التعلم الحركي، ووضع متطلبات خاصة على الدراسات فيما يتعلق بمهام العالم الحقيقي.

## (٥,٦) خلاصة ونتائج

## Conclusions

هناك طلب متزايد على تقنيات قياس صناعية ومطالب لزيادة جودة التصنيع في الوقت ذاته. مراقبة حركة المرور لها العديد من التطبيقات من أجل طرق القياس عن بعد. تحتاج العديد من الأنظمة الرياضية أجهزة قياس للحصول على تغذية راجعة عن التدريب لتطوير القدرة البدنية والقدرة العقلية. وتحتاج قياسات تشخيصية طبية جديدة أيضا لأجهزة استشعار جديدة أكثر وثوقية وأسرع. هناك اهتمام أوسع لرصد المنشآت الضخمة مثل الجسور والمباني والسدود لمنع وقوع الحوادث التي تنتج عن فشلها. يمكن أن يعطي الاستشعار الضوئي إمكانيات جديدة لمعاينة متطلبات القياس.

يلعب قياس المسافة و موضع الحزم ضوئياً دوراً هاماً؛ كما أن له العديد من المزايا مقارنة مع الطرق التقليدية: بدون اتصال، إمكانية استخدامه لإجراء قياسات سريعة بتمايز عال، و في ظروف قاسية (EMI، ودرجة حرارة ، إلخ). على الرغم من أن الطرق تعتمد على مبادئ وأساليب قياس عديدة (زمن الرحلة مع تطبيقات عديدة، التثليث، و التداخل، و الحساسات الليفية، و عمليات التصوير، و المحاذاة، و الضبط المحرقي الآلي، وما إلى ذلك) فإن كل مبدأ له خصائص محددة و مزايا خاصة مطلوبة

لمختلف التطبيقات. على سبيل المثال، أصبح التثليث طريقة موحدة لتحديد الشكل و لقياسات المدى القريبة. طريقة التثليث ليست مناسبة عموما لقياس الحواف أو الثقوب بسبب تأثيرات التظليل. يقدم قياس زمن الرحلة عن بعد حلولا للمسافات الطويلة وبدون مفعول التظليل طريقة الـ TOF النبضية مناسبة تماما للأهداف المتحركة غير التعاونية، لأن النبضة الواحدة تلامس العنصر بزمن قصير جداً. تكون مدة بقاء النبضة عادة نانو ثانية. بالنسبة لطريقة إزاحة الطور فإنها ذات دقة جيدة عند قياس هدف غير متحرك متعاون (عاكس). مجال التطبيق الأسرع تطوراً حالياً هو على سبيل المثال مراقبة حركة المرور، حيث يحتاج عدد كبير من أنظمة المراقبة لقياس موثوق في ظروف بيئية صعبة. تعمل أجهزة التحسس TOF التي هي قيد الاستخدام كمشغلات ذكية لكاميرا المرور، ولقياس الشكل الجانبي للمركبة ولتصنيف المركبات إضافة إلى قياس السرعة. يجب أن تكون طريقة القياس دائما ملائمة و مميزة، ومثالية ومعدة خصيصا للتطبيق المحدد.