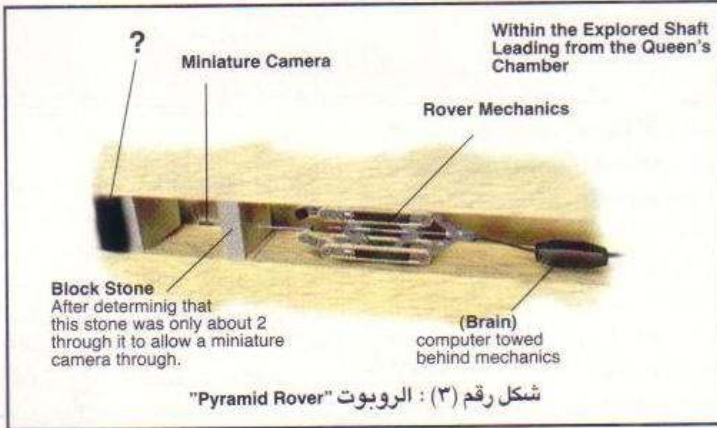


كيف تبني "روبوت" حقيقي؟

٦. مستشعرات الحالة الداخلية Inner - State Senesors

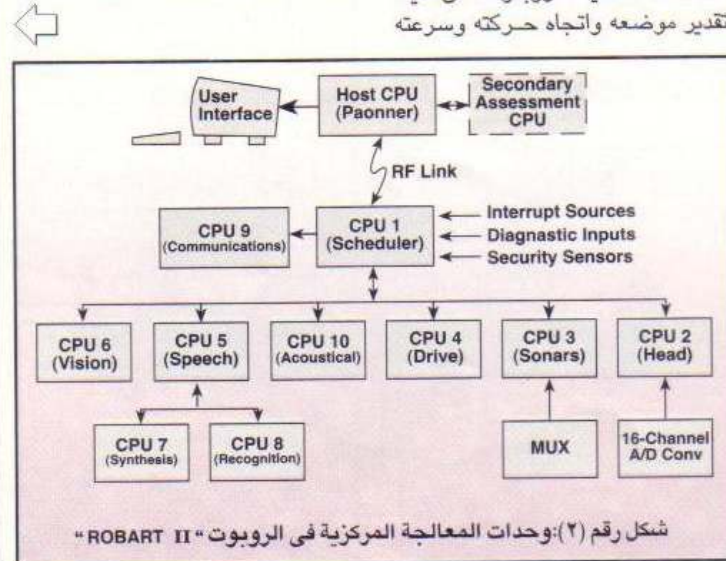
مهندس علاء خميس

مدرس مساعد بكلية هندسة البترول - جامعة قناة السويس



إلخ.. ومستشعرات الحالة الخارجية التي توفر معلومات عن الصفات والحالة الهندسية للأغراض والعوائق المحيطة «بالروبوت». وفي هذا المقال.. سنبدأ في عرض مستشعرات تقدير الموضع Dead Reckoning والتي تعنى بقياس الإزاحة المطلقة ليتم بعد ذلك تحديد الموضع بدلالة موضع معلوم يؤخذ كنقطة مرجع. وتعتبر عملية تحديد موضع واتجاه «روبوت» جوال من الأمور التي يجب دراستها بعناية.. يعكس المناول الميكانيكي Manipulator المستخدم بكثرة في الصناعة حيث تكون حركة محدودة في نطاق معين Work-Engvelop.. وبالتالي يمكن معرفة موضع أى نقطة في المناول في أى وقت بتثبيت مشفرات Encoders في وصلات Joints المناول. وفي حالة «الروبوت» الجوال.. نجد أنه يتمتع بدرجة عالية من الحركة Mobility كما نجد أن تثبيت مشفرات لقياس إزاحة

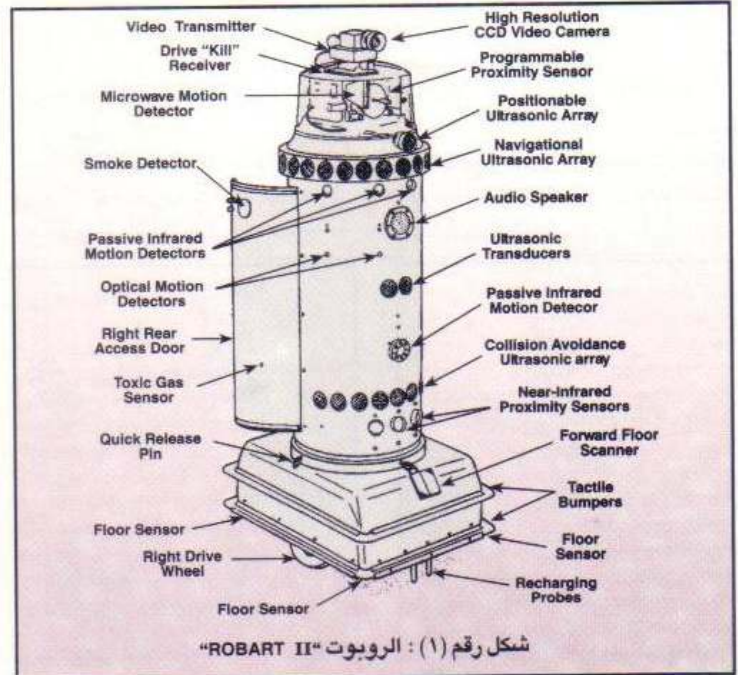
موجات فوق سمعية غير تقليدي لقياس سمك الجدار الصخري.. ليتم بعد ذلك ثقب فتحة في هذا الجدار لتميرير ذراع «الروبوت» المثبت به كاميرا صغيرة لمشاهدة ما يوجد خلف ذلك الجدار - شكل رقم (٣). من هذين المثالين.. يتضح لنا ضرورة تفهم وظيفة وإمكانات وأوجه قصور واحتياجات كل مستشعر ليتم بعد ذلك اختيار المستشعر طبقاً للمهمة المراد «للروبوت» إنجازها. والعبرة ليس في بناء منظومة استشعار معقدة.. ولكن في كيفية توظيف المستشعرات بطريقة مثلى تساعد «الروبوت» على أداء المهمة وبأقل قدر ممكن من الطاقة الكهربائية والقدرة الحاسوبية. وفي المقال السابق.. تم تقسيم المستشعرات إلى نوعين أساسيين حسب المعلومات التي يوفرها المستشعر.. وهما مستشعرات الحالة الداخلية التي تعنى بدراسة ومعرفة الصفات الداخلية «للروبوت» من حيث تقدير موضعه واتجاه حركته وسرعته

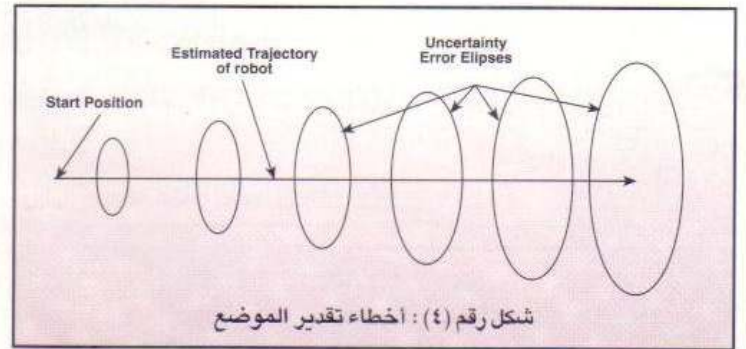
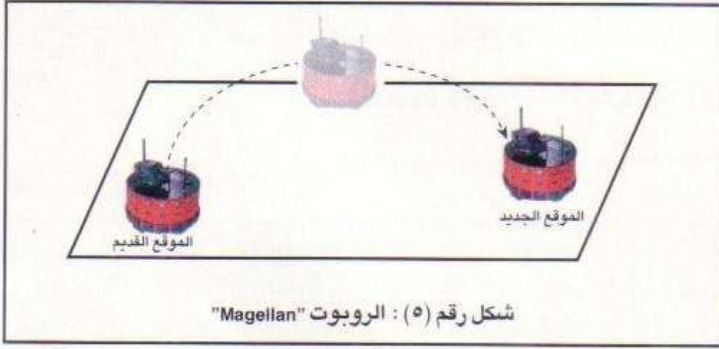


«السونار» باكتشاف وجود عوائق لحماية «الروبوت» من التصادم.. ويقوم مكتشف الدخان Smoke De-tector ومكتشف الغازات السامة بإكساب «الروبوت» حاسة الشم لاكتشاف الحرائق قبل انتشارها أو وجود غازات سامة.. بينما تتولى مستشعرات الموجات تحت الحمراء اكتشاف العوائق القريبة جداً من «الروبوت» والتي لا يمكن اكتشافها بواسطة «السونار». ويقوم مستشعر التلامس Tactile Bumpers بإيقاف «الروبوت» في حالة اصطدامه بأى عائق لحمايته. ويمكن أيضاً تزويد «الروبوت» بوسائل دفاع بسيطة ولكنها فعالة في نفس الوقت.. مثل وحدة امتصاص غازات سامة أو مسدس تخدير أو وحدة إنذار صوتية أو ضوئية. ويحتاج بناء «روبوت» بمقدرة استشعارية كهذه إلى قدرة حاسوبية عالية مما يتطلب استخدام عدد كبير من وحدات المعالجة المركزية CPU كما هو موضح بالشكل رقم (٢). وفي حالة «روبوت» مركبة الهرم Pyramid Rover الذى استخدم مؤخراً في محاولة اكتشاف هرم خوفو.. فإنه لم يحتوى على هذا الكم الهائل من المستشعرات.. وإنما فقط على كاميرا لنقل صورة حية للنفق الذى يتحرك خلاله ومستشعر

تحدثنا فى المقال السابق عن أهمية استخدام المستشعرات لاكتساب «الروبوت» القدرة على التفاعل مع البيئة المحيطة به والقيام بانجاز مهام عديدة فى أوساط عادة ما تشكل خطورة على الإنسان.. مثل إزالة الألغام أو صيانة معدات وخطوط نقل الضغط العالى أو تناول المواد المشعة وصيانة المحطات النووية أو عمليات الإنشاء والبحث والصيانة تحت الماء إلخ. وعند الشروع فى بناء منظومة استشعار «للروبوت».. يجب الأخذ فى الاعتبار ضرورة توافق تلك المنظومة مع المهمة المصمم من أجلها «الروبوت» والقدرة الحاسوبية الواجب توافرها لضمان عمل تلك المستشعرات بطريقة صحيحة.

فعلى سبيل المثال.. يحتوي الروبوت «ROBART II» - على العديد من المستشعرات نظراً لطبيعة استخدامه فى مجال حراسة المبانى الاستراتيجية.. فبواسطة منظومة الرؤية يتم نقل صورة حية للمكان المكلف «الروبوت» بحراسته.. كما يمكن بناء منظومة رؤية أكثر تعقيداً تمكن «الروبوت» من التعرف الذاتى على الأغراض أو الأشخاص المحيطين به. وتقوم مستشعرات الموجات فوق السمعية Ultrasonic أو





بالرجوع إلى الشكل رقم (٧) نجد أن:

$$C_1 = 2\pi (d + b)$$

حيث.. C_1 : محيط دائرة حركة العجلة اليسرى - d : المسافة بين عامودي إدارة العجلة اليمنى واليسرى - b : نصف القطر الداخلي. وبالتالي.. فإن:

$$D_1/C_1 = \theta / 2\pi$$

$$C_1 = 2\pi D_1 / \theta$$

أو من المعادلات السابقة يمكن استنتاج أن:

$$\theta = D_1 / (d + b)$$

$$C_r = 2\pi b$$

حيث.. C_1 : محيط دائرة حركة العجلة اليمنى.

$$C_r = 2\pi D_r / \theta$$

$$D_r / C_r = \theta / 2\pi$$

وحيث أن : $b = D_r / \theta$.. يمكن استنتاج أن:

$$\theta = D_1 / [d + (D_r/\theta)] = (D_1 - D_r) / d$$

من هذه المعادلة.. يمكن استنتاج أن زاوية توجيه «الروبوت» تعتمد على إزاحة العجلتين والمسافة الفاصلة بين محوريهما.. وبالتالي فقياس إزاحة العجلتين باستخدام المشفرات كما سيتم شرحه.. يتيح تحديد إزاحة وزاوية توجيه «الروبوت».

- منظومة تحرك السيارة أو محرك «أكرمان» "Akerman" Steering:

في هذه المنظومة.. يتم استخدام أربع عجلات كما هو موضح بالشكل رقم (٨). يمكن وصف هذه المنظومة بالمعادلات التالية.



$$X_{n+1} = X_n + D \sin\theta$$

$$Y_{n+1} = Y_n + D \cos\theta$$

حيث.. D : إزاحة «الروبوت» المقاسة بواسطة الأودومتر - θ : زاوية التوجيه.

من هذا المثال.. تتضح أهمية معرفة معادلات الحركة الكينماتيكية التي تصف حركة «الروبوت» بصرف النظر عن اعتبارات الكتلة والقوة. وتختلف هذه المعادلات باختلاف منظومة التحرك. وقد تم الإشارة إلى منظومات تحرك «الروبوتات» الجوال في مقال سابق - العدد رقم (٧١) - وفي هذا المقال.. سيتم عرض معادلات الحركة لمنظومات التحرك الشائع استخدامها.

التشكيلات التحريكية

Mobility Configurations

- المحرك التفاضلي:

في هذه المنظومة.. يتم استخدام محركين لتوفير حركة أمامية أو خلفية أو دورانية حسب قيمة وقطبية جهدي المحركين مع تثبيت عجلة محورية Caster Wheel بدون محرك بغرض حفظ الاتزان. في هذه المنظومة نجد أن:

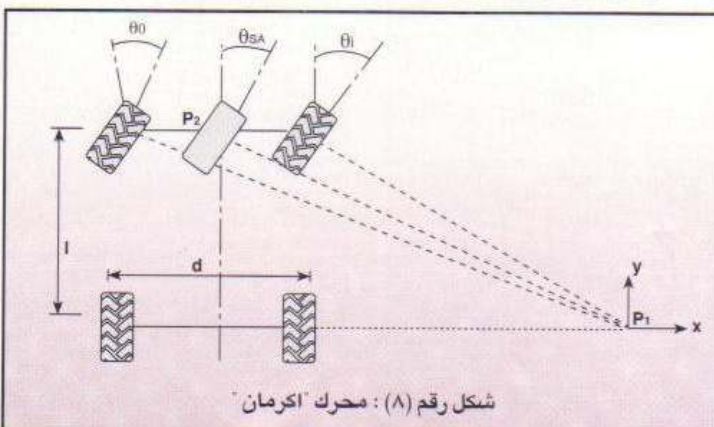
$$D = (D_1 + D_r) / 2$$

حيث.. D : إزاحة الروبوت - D_1 : إزاحة العجلة اليسرى - D_r : إزاحة العجلة اليمنى.

وبالتالي تكون سرعة «الروبوت»:

$$V = (V_1 + V_r) / 2$$

حيث.. V_1 : سرعة العجلة اليسرى - V_r : سرعة العجلة اليمنى.



لتحديد مكان «الروبوت» بدلالة مواضع علامات مثبتة مسبقاً Landmarks في البيئة التي يتحرك فيها «الروبوت» يتم التعرف عليها بواسطة منظومة الرؤية. وهناك طريقة أخرى يتم فيها تكوين خريطة للبيئة باستخدام بيانات مستشعر «السونار» أو «الليزر» أو الاليتين معاً يتم استخدامها بعد ذلك في تحديد موضع «الروبوت». وفي بعض المنظومات يستخدم أيضاً مرشد إشعاع لاسلكي Active Beacons كما هو الحال في الطائرات والسفن لتحديد موضع «الروبوت». وفي الأماكن المفتوحة Outdoor.. عادة ما يتم استخدام منظومة تحديد الموضع العالمي عن طريق الأقمار الصناعية Global Positioning System (GPS). وهذه الطرق دقيقة إلى حد كبير ولكن تكلفتها عالية وخاصة في حالة استخدام منظومة (GPS).

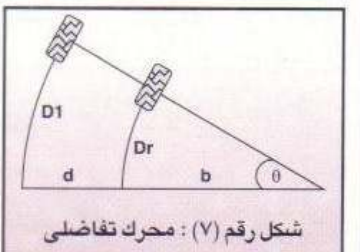
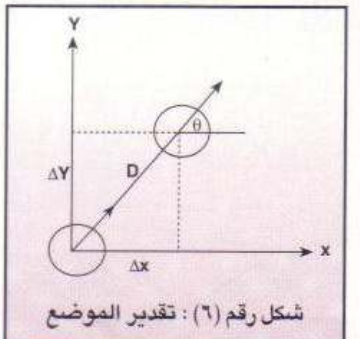
وسوف نتناول هذه التقنيات بالتفصيل في مقالات تالية. وسنكتفي في هذا المقال بعرض بعض الطرق المباشرة المستخدمة في تحديد موضع «روبوت» جوال.

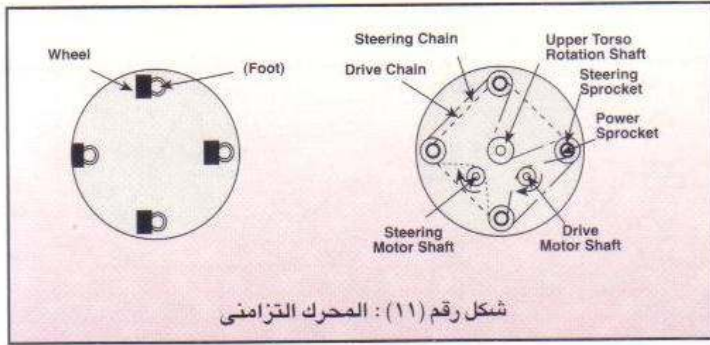
يستخدم المصطلح Odometry أو Odometry أو عداد المسافات.. للتعبير عن مستشعر تقدير الموضع والذي يمكن به معرفة موضع «الروبوت» بدلالة المسافة المقطوعة. فعلى سبيل المثال.. في حالة الحركة في خط مستقيم (بدون دوران) - شكل رقم (٦) - يمكن حساب موضع «الروبوت» بدلالة موضع آخر من المعادلتين:

المركبة لا يعطي نتائج دقيقة في حالات كثيرة مثل انزلاق «الروبوت» أو ميله بسبب تعرجات السطح المتحرك عليه مما يسبب أخطاءً في تحديد الموضع. يمثل الشكل رقم (٤) العلاقة بين المسار المتوقع «لروبوت» جوال والقطع الناقص لعدم التحقق Uncertainty الذي يمثل المدى الاحتمالي لوجود «الروبوت».. حيث يلاحظ أن أخطاء تقدير الموضع تراكمية وبالتالي تزداد مع استمرار الروبوت في حركته.

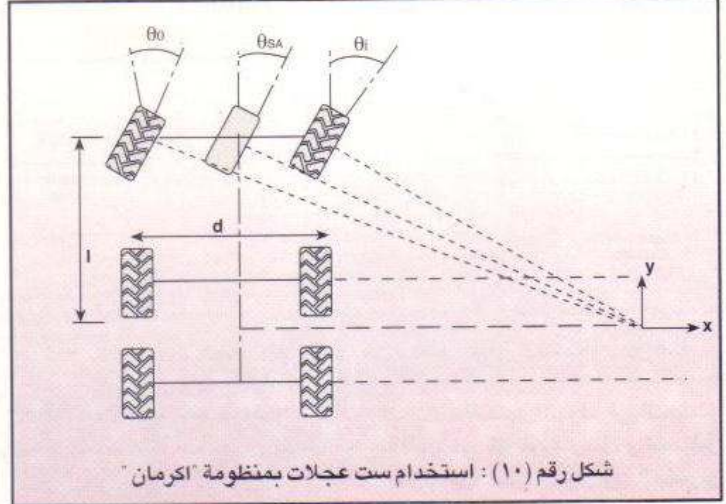
كما أن هناك مشكلة أخرى تتمثل في حقيقة أن عمل المشفر يعتمد على حركة «الروبوت» لقياس عدد اللفات التي يدورها المحور أو إزاحته الدورانية. فإذا تخيلنا أن لدينا «روبوت» صغير «كالروبوت» Magellan الموضح بالشكل رقم (٥).. أن أحد الأشخاص قام برفعه ووضع في مكان آخر.. في هذه الحالة سنجد أن مستشعر تحديد الموضع التقليدي يعطي نفس القراءة وهي تمثل قيمة خاطئة غير مطابقة للموضع الحالي «لروبوت».

وتجدر الإشارة إلى أن هناك طرق أخرى غير مباشرة أكثر دقة لتحديد موضع «الروبوت».. ولكنها أكثر تعقيداً وتحتاج إلى تجهيزات خاصة.. مثل استخدام منظومة رؤية «روبوتية»





شكل رقم (١١): المحرك التزامني



شكل رقم (١٠): استخدام ست عجلات بمنظومة «أكرمان»

بشكل يؤدي إلى تحرك تزامني في نفس الاتجاه دائماً. يوضح الشكل رقم (١١) الاتصال الميكانيكي بين أربع عجلات في المحرك التزامني.

وتتميز هذه المنظومة بدرجة عالية من الاتزان. وبتحريك قطر العجلات. يمكن زيادة قدرة المركبة على تسلق العوائق. ولكن زيادة القطر.. تسبب أخطاء تراكمية في منظومة تحديد الموضع وخاصة في حالة وجود تعرجات على الأرضية. ولتغلب على هذه المشكلة.. يمكن استخدام طريقة الاتصال الميكانيكي بين محور الإدارة والعجلة كما هو مبين بالشكل رقم (١٢). تعمل هذه الطريقة على جعل العجلة تدور في اتجاه مناسب عند دوران المحور الرئيسي لتقليل الاحتكاك مع الأرضية وانزلاق العجلة. ويمكن حساب درجة الانزلاق الصغرى Minimal Slippage في المنظومة من العلاقة التالية:

$$A/B = r_1/r$$

حيث: A : عدد أسنان ترس عامود الإدارة الرئيسي - B : عدد أسنان ترس محود العجلة - r2 : المسافة بين مركز العجلة ومحور الدوران - r : نصف قطر العجلة.

تعتبر حسابات تقدير الموضع للمحرك التزامني من الحسابات

$$\cot \theta_1 - \cot \theta_0 = d/l$$

حيث: θ_i : زاوية التوجيه النسبية للعجلة الداخلية - θ_0 : زاوية التوجيه النسبية للعجلة الخارجية - l : المسافة الفاصلة الطولية - d : المسافة الفاصلة الجانبية.

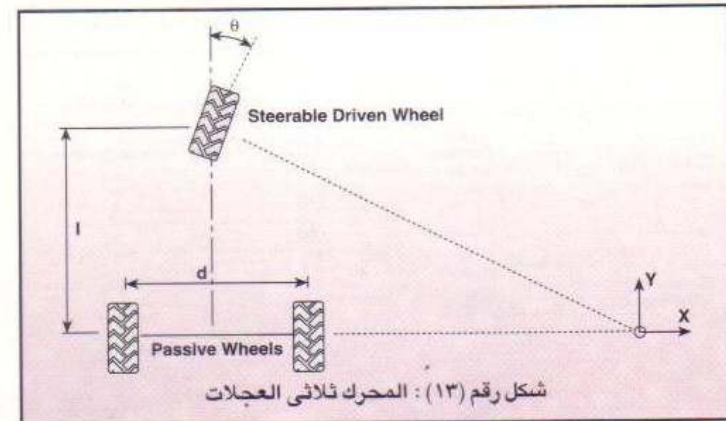
بفرض أن θ_{SA} زاوية توجيه «الروبوت» أو زاوية توجيه عجلة مركزية تخيلية Imaginary Center Wheel.. نجد أن:

$$\cot \theta_{SA} =$$

$$\cot \theta_0 - (d/2L) \cot \theta_{SA} = (d/2L) + \cot \theta_1$$

وبالتالي.. يمكن معرفة زاوية توجيه «الروبوت» بدلالة زاوية توجيه العجلة الخارجية أو الداخلية. وفي حالة استخدام ست عجلات في منظومة التحرك كما هو الحال في «الروبوت» Suttogate Teleoperated Vehicle (STV) بالشكل رقم (٩).. تكون تشكيلة منظومة التحرك كما هو مبين بالشكل رقم (١٠). ويمكن استخدام نفس المعادلة لتحديد زاوية توجيه «الروبوت».

المحرك التزامني Synchro Drive: تعتمد آلية تشغيل هذه المنظومة على وصل جميع عجلات المركبة



شكل رقم (١٣): المحرك ثلاثي العجلات

البيسطة إلى حد ما.. حيث يتحدد اتجاه المركبة بقيمة زاوية الدوران المقاسة بواسطة المشفر مثلاً.. حيث تتحرك جميع العجلات معاً في نفس الاتجاه.. بينما يمكن حساب إزاحة المركبة من المعادلة التالية:

$$D = 2\pi N Re / Ce$$

حيث: D : إزاحة المركبة - N : عدد اللفات المقاسة بواسطة المشفر المثبت على محور الدوران - Ce : عدد اللفات في كل دورة كاملة - Re : نصف قطر العجلة.

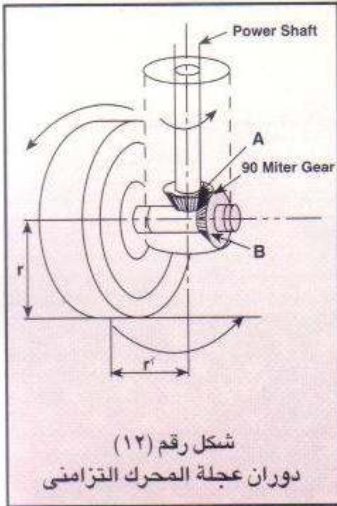
المحرك ثلاثي العجلات Tricycle Drive:

في هذه المنظومة.. يتم استخدام ثلاث عجلات بالتشكيلة الموضحة في الشكل رقم (١٢) وهذه المنظومة تشبه منظومة «أكرمان».. حيث تحل العجلة الأمامية محل عجلة «أكرمان» التخيلية.. وبالتالي يمكن استخدام معادلة «أكرمان» لحساب زاوية التوجيه باعتبار أن θ تساوي θ_{SA} .

محرك كل الاتجاهات Omni-Directional:

توفر هذه المنظومة درجة عالية من حرية الحركة «للروبوت» بفضل شكل العجلة الهندسي كما هو موضح بالشكل رقم (١٤).

ويوضح الشكل رقم (١٥) منظومة كرسي متحرك لمساعدة المعوقين يستخدم فيه هذا النوع من العجلات لتوفير درجات متعددة من حرية الحركة.



شكل رقم (١٢)

دوران عجلة المحرك التزامني

وفي هذه المنظومة.. تكون معادلات الحركة كالتالي:

$$V_1 = \omega_1 r = V_x + \omega_p R$$

$$V_2 = \omega_2 r = -0.5V_x + 0.867 V_y + \omega_p R$$

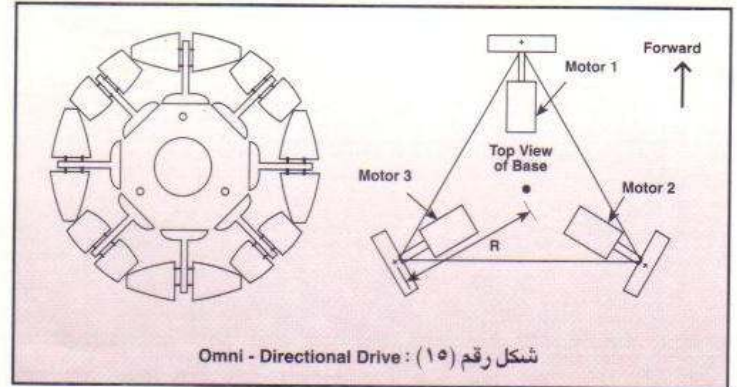
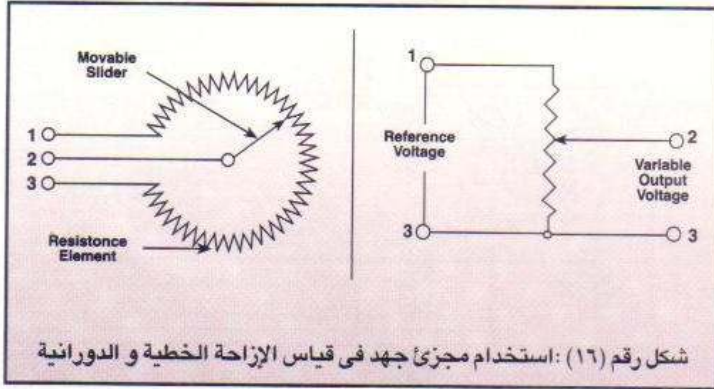
$$V_3 = \omega_3 r = -0.5V_x - 0.867 V_y + \omega_p R$$

حيث V_1, V_2, V_3 : السرعات الخطية للعجلات أرقام 1 و 2 و 3 على الترتيب و $\omega_1, \omega_2, \omega_3$: السرعات الدورانية للعجلات أرقام 1 و 2 و 3 على الترتيب - r : نصف قطر العجلة - R : المسافة بين مركز العجلة ومركز المنظومة - ω_p : معدل دوران القاعدة حول محور «الروبوت».

مما سبق.. يتضح لنا أهمية قياس الإزاحة والسرعة الخطية أو الدورانية لعجلة «الروبوت» ليتم بعد



شكل رقم (١٤): الروبوت «Uranus»



يختلف الجهد المتولد في العضو الثابت في كل من المرسل والمستقبل مما يسبب سيران تيار بين العضوين الثابتين وبالتالي تولد عزم على كل من العضوين الدوارين. بالأخذ في الاعتبار أن العضو الدوار في المرسل مقيد.. فإن العزم المسلط على العضو الدوار للمستقبل يعمل على إعادة المحاذاة وبالتالي اتزان «السنكرو».

يشبه المستبين Resolver إلى حد كبير «السنكرو».. حيث يولد جهوداً متناسبة مع جيب أو جيب تمام زاوية دوران العضو الدوار كما هو مبين بالشكل رقم (١٨). وفي هذه الحالة.. يعطى خرج العضوين الثابتين من المعادلتين التاليتين:

$$V_x = K_x \sin\theta \sin(\omega t + \alpha_x)$$

$$V_y = K_y \cos\theta \sin(\omega t + \alpha_y)$$

حيث.. θ : زاوية دوران العضو الدوار
 $\omega = 2\pi f$: حيث f : تردد الاثارة - K_x و K_y ثوابت - α_x و α_y إزاحة الطور بين العضوين الثابت والدوار.

يعتبر المستبين من الوسائل ذات الاعتمادية العالية في قياس الموضع الزاوي المطلق.. ويتميز بالدقة وصغر الحجم بالإضافة إلى سعره المناسب. يمكن أيضاً استخدام مستبين خالي من الفرشاة - شكل رقم (١٩) - حيث يستخدم فيه محول أسطواني من نوع خاص بدلاً من حلقات الانزلاق.. وبالتالي فإنه لا يحتاج إلى صيانة. يعيب هذا النوع من المستبينات زيادة استهلاك الطاقة بالإضافة إلى زيادة الطول.

السنوات الأخيرة استخدام مجزئات الجهد كمستشعرات دوران بالمقارنة بالمشفرات الضوئية.

«السنكرو» والمستبين Syn-chros Resolvers

يعرف «السنكرو» على أنه جهاز كهروميكانيكي لنقل المعلومات الزاوية من مكان إلى آخر بدقة عالية.. يشكل «السنكرو» محول متغير التقارن Variable Coupling ويتكون من عضو دوار Rotor بإثارة تيار متغير كملف ابتدائي وملفين أو أكثر موزعين بالتساوي حول العضو الدوار ويعملان كعضو ثابت Stator. وكما هو معروف.. فإن التقارن المغناطيسي الفعال بين ملفات العضو الثابت والعضو الدوار يتغير بتغير زاوية دوران العضو الدوار بالنسبة للعضو الثابت حيث يصل إلى قيمة عظمى في حالة توازي المجالين.. وإلى قيمته الصغرى عند تعامد مجال العضو الدوار مع ملفات العضو الثابت. يوضح الشكل رقم (١٧) «سنكرو» يحتوى على وحدة إرسال واستقبال لقياس زاوية دوران عامود إدارة.. وعند ضبط المحاذاة أو الاستقامة الطولية Alignment للعضوين الدوارين في كل من المرسل والمستقبل بالمستبينات المستقبلة الثابتين المناظرين.. يتولد خرج متساو في كل من المرسل والمستقبل. يفقد «السنكرو» حالة الاتزان هذه عند دوران عامود إدارة العضو الدوار بتأثير قوة خارجية.. حيث

التكلفة في التطبيقات التي يتحرك فيها «الروبوت» بسرعات منخفضة والتي لا تتطلب دقة عالية. وكما هو معروف.. فإن فكرة العمل تعتمد على استخدام مقسم جهد بمنزلق متحرك يتم ربطه بمحور الدوران.. وتتغير قيمة جهد الخرج بتغير موضع المنزلق على مقاومة مقسم الجهد حيث يتناسب جهد الخرج خطياً مع الإزاحة في حالة الحركة الخطية ومع زاوية الدوران في حالة الحركة الدورانية - شكل رقم (١٦).

ومن أنواع مجزئات الجهد المستخدمة في مجال «الروبوت» LCP8, LCP12Y, LCPL. وبالإضافة إلى الاحتكاك الذي يسببه مجزئ الجهد.. فإن العيب الأساسي لمجزئات الجهد يتمثل في قلة الاعتمادية نتيجة تزايد الاتساخ وبلبلى الأسلاك الذي لا يمكن تجنبه مما يتسبب في أداء غير سليم للمجزئ.. كما أن هناك أخطاء أخرى يمكن أن تنتج عن ارتخاء سير التوصيل Belt في حالة عدم وجود اتصال مباشر بين عجلة «الروبوت» ومحور إدارة المحرك. لهذه الأسباب.. قل في

ذلك استخدام المعادلات الكينماتيكية حسب شكل منظومة التحرك لتحديد موقع «الروبوت» الحالي بالنسبة لموقع معلوم.. كأن يكون على بعد ١٠ أمتار من نقطة البدء.. كما يمكن استخدام هذه المعلومة في منظومة الإبحار Navigation Sys-tem للتعبير عن الموقع بطريقة طبوغرافية.. كأن يكون في الحجرة رقم ٢ في الدور الثالث مثلاً.. في الفقرة التالية سيتم الإشارة إلى نوعين من مستشعرات الحالة الداخلية الممكن استخدامها في قياس الإزاحة الخطية أو الدورانية.. وسوف نواصل في المقال التالي عرض أنواع أخرى حيث سنتناول كيفية استخدام المشفرات الضوئية بالتفصيل باعتبارها من أكثر الوسائل استخداماً في تحديد موضع «الروبوت».

مستشعرات الحالة الداخلية - مجزئ الجهد Potentiometer: يستخدم مجزئ الجهد كمستشعر إزاحة دورانية منخفض

