كيف تبنى «روبوت» حقيقى ؟

٣ ـ اختيار المحرك وتصميم منظومة التحرك

مهندس علاء خميس

مدرس مساعد بكلية هندسة البترول - جامعة قناة السويس

عرضنا فى المقال السابق.. كيفية توفير القدرة الكهربية اللازمة لتشغيل «الروبوت». وفى هذا المقال نتناول كيفية اختيار المحرك الكهربى وتصميم منظومة التحرك Locomotion System. والمعروف.. أن معظم «الروبوتات» وبخاصة «الروبوتات» الجوالة ذاتية التحكم Autonomous Mobile Robots تستخدم محركات التيار المستمر لسهولة التحكم فى السرعة واتجاه الحركة. ويمكن تقسيم محركات التيار المستمر المستخدمة فى مجال «الروبوت» إلى نوعين أساسيين.. محركات مستمرة Continuous Motors ومحركات خطوة Stepping Motors. وفى المحركات المستمرة.. يدور العضو الدوار بصورة متواصلة بمجرد توصيل مصدر القدرة الكهربية.. ويتوقف عن الدوران إذا تم فصل التغذية أو تم تحميل المحرك بحمل أكبر بكثير من قدرته المقننة. ومن أشهر محركات هذا النوع وأكثرها استخداماً.. المحركات ذات المغناطيس الدائم Permanent Magnet والمحركات الخالية من الفرشة Brush-less Motors ومحركات المانعة المغناطيسية المتغيرة Variable Reluctance Motors. أما بالنسبة لمحركات الخطوة.. فإن توصيل مصدر القدرة يسبب حركة العضو الدوار عدة درجات ثم يتوقف بعدها عن الدوران. ومن أشهر محركات هذا النوع.. محرك الخطوة ذو المغناطيس الدائم Permanent Magnet Stepper Motors.

مواصفات المحرك

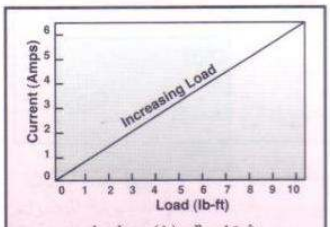
عند اختيار المحرك.. يجب التأكد من ملاءمة مواصفاته والوظيفة المصمم من اجلها «الروبوت». من هذه المواصفات:

ـ الجهد: تقنن كل المحركات بجهد التشغيل Operating Voltage. وعلى سبيل المثال.. فإن محركات لعب الاطفال لها جهد مقنن يتراوح بين ١,٥ ـ ٦ ف.. وتصمم بعض محركات التيار المستمر ذات الجودة العالية بجهد مقنن ثابت مثل ١٢ أو ٢٤ف. وتستخدم معظم «الروبوتات» الشخصية محركات بجهد مقنن يتراوح بين ١,٥ ـ ١٢ ف. من الجدير بالذكر.. أن معظم المحركات يمكن تشغيلها بجهد أعلى أو أقل من جهدها المقنن.. ولكن معظمها يرفض التشغيل إذا قل الجهد عن ٥٠٪ من الجهد المقنن. وفى حالة عدم معرفة جهد المحرك.. فإنه يمكن التخمين باستخدام جهود مختلفة وملاحظة الجهد الذى يعطى أعلى قدرة مع أقل فقد فى صورة حرارة فى ملفات المحرك. يمكن أيضاً ملاحظة الصوت الصادر عن المحرك فى حالة تغذيته بجهد غير مناسب.

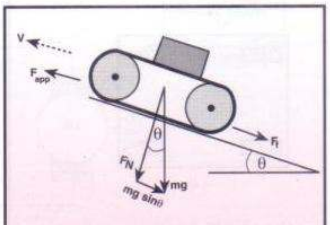
ـ التيار: فى معظم محركات المغناطيس الدائم Permanent Magnet ـ باعتبارها أكثر الأنواع استخداماً ـ تزداد قيمة التيار المسحوب من المصدر بزيادة الحمل كما هو موضح بالشكل رقم (١). لذا.. يراعى عند اختيار محرك «الروبوت» معرفة قيمة سحب التيار والمحرك فى حالة تحميل.

ـ السرعة: تقاس السرعة الدورانية للمحرك بعدد اللفات فى الدقيقة الواحدة Revolution per minute (rpm) وهى تتراوح بين ٤٠٠٠ ـ ٧٠٠٠ لفة / دقيقة فى معظم محركات التيار المستمر. وعلى الرغم من وجود بعض الأنواع مثل المحركات المستخدمة فى مشغلات الأقراص بالحاسبات تتراوح سرعتها بين ٢٠٠ ـ ٣٠٠ لفة / دقيقة.. إلا أن هذه المقننات تعتبر عالية جداً فى التطبيقات «الروبوتية» مما يتطلب استخدام صناديق تروس أو دوائر الكترونية لتقليل السرعة الدورانية إلى حوالى ١٥٠ لفة / دقيقة. ويلاحظ.. أن سرعة محركات الخطوة لا تقاس بعدد اللفات فى الدقيقة.. إذ أنها دالة فى عدد الخطوات المطلوبة لعمل دورة كاملة مجموع عليها عدد النبضات المرسلة إلى المحرك كل دقيقة. وللمقارنة.. فإن السرعة الدورانية لهذه المحركات تتراوح بين ١٠٠ ـ ١٤٠ لفة/ دقيقة.

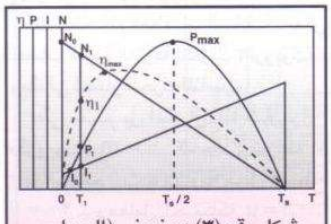
ـ العزم: هو القوة التى يؤثر بها المحرك على الحمل. وكلما زاد عزم المحرك. كلما أمكن زيادة الحمل المراد تحريكه بواسطة المحرك. تقنن المحركات بعزم التشغيل Running Torque وهو القوة المؤثرة والمحرك فى حالة دوران. وتعتبر هذه القيمة مهمة جدًا فى التطبيقات «الروبوتية» لأنها تحدد الحمل المناسب الممكن تحمليه على المحرك. وهناك قيمة أخرى للعزم تعرف بعزم التوقف Stall Torque وهو القوة المؤثرة ومحور المحرك فى حالة فرملة. وهناك علاقة غير مباشرة بين عزم التشغيل وعزم التوقف.. تتغير من محرك إلى آخر. وعادة.. فإن عزم التوقف لايتجاوز ١٠ ـ ٢٠٪ من عزم التشغيل. يمكن استخدام مقنن عزم التوقف لاختيار المحرك المناسب لتصميم «الروبوت».



شكل رقم (١) : منحنى تغير التيار مع الحمل



شكل رقم (٢) : مخطط الجسم الحر



شكل رقم (٣) : منحنى (الحمل - الكفاءة - التيار) لمحرك تيار مستمر

اختيار المحرك المناسب

لحساب قدرة المحرك اللازمة لتشغيل «الروبوت».. سوف نفترض أن منظومة تحركه تحتوى على محركين فى حالة صعود مستوى مائل بزاوية θ بسرعة منتظمة v كما هو موضح بالشكل رقم (٢). الذى يوضح القوى المختلفة التى يتعرض لها «روبوت» كتلته m وهو فى حالة الصعود. ونظرًا لأن «الروبوت» يتحرك بسرعة منتظمة.. فإن عجلة التحرك a تساوى صفر.. وبالتالى فإن محصلة القوى F تساوى صفر.. حيث أن F=ma وهو ما يعنى وجود اتزان بين القوة الدافعة Fapp وقوى المقاومة (قوة الجاذبية Fw وقوة الاحتكاك Ff والتى تعمل فى اتجاه معاكس لاتجاه الحركة).

$F_{app} = F_w + F_f$

$F_f = \mu . F_N = m.g. \cos\theta$

$F_w = m.g. \sin\theta$

حيث: μ معامل الاحتكاك ـ و g عجلة الجاذبية وتكون القدرة اللازمة لمنظومة التحرك لإنتاج القوة الدافعة المطلوبة لتحريك «الروبوت» بسرعة v هى:

$P_m = F_{app}.v$

وبالأخذ فى الاعتبار أن منظومة التحرك تحتوى على محركين.. فإنه يمكن حساب العزم والسرعة المطلوبين لكل محرك من العلاقة التالية:

$P_m/2 = T.\omega \quad \& \quad \omega = v/r$

شكل رقم (٤) : إنقاص سرعة المحرك باستخدام التروس

شكل رقم (٥) : روبوت مسار

شكل رقم (٦) : الروبوت Genhis

حيث r هو نصف قطر إطار «الروبوت».

ويعتمد مدى وزمن تشغيل «الروبوت» على قدرة مصدر التغذية. فإذا كان مصدر التغذية هو بطارية توفر E جول فى زمن t=E/P.. فإن المسافة D التى يمكن أن يقطعها «الروبوت» = v t.

باستخدام العلاقات السابقة.. يمكن حساب القدرة اللازمة لتحريك «الروبوت».. وبالتالى اختيار المحرك المناسب.

على سبيل المثال: إذا كان وزن «الروبوت» m = ٢٠٠جم ـ وسرعته V = ٠,٧٥سم /ث ـ وزاوية ميل السطح θ = ٣٠° ـ ومعامل احتكاكه μ =٠,٣ .. تكون القدرة اللازمة:

$$P_m = F_{app} . v$$

$$= m.g (\mu \cos \theta + \sin \theta) . v$$

$$P_m = (2Kg \times 9.81\ m/s^2).$$

$$(0.3 \cos 30 + \sin 30) (0.75\ m/s)$$

$$= 1.12\ W$$

وبملاحظة منحنى (الحمل الكفاءة – التيار) لمحرك التيار المستمر – شكل رقم (٣) – نجد أنه يجب اختيار المحرك بقدرة مقننة أعلى من القيمة المحسوبة.. مع مراعاة أن أعلى كفاءة يتم الحصول عليها عند حمل أقل من نقطة القدرة العظمى. لذا.. يوصى باختيار المحرك بقدرة مقننة ثلاثة أضعاف القيمة المسحوبة تقريباً:

$$P_m = 3.36\ W \text{ or } P_m/2 = 1.68\ W$$

من المعادلات السابقة.. يمكن حساب السرعة الزاوية والعزم بمعلومية نصف قطر عجلة «الروبوت».. وعلى فرض أن نصف القطر ٥سم.. تكون السرعة الزاوية ١٤٠°والعزم١٢نيوتن م:

صندوق التروس Gear Box

تحتاج منظومات التنقل فى «الروبوت» Locomotion Systems إلى محركات بسرعات تتراوح بين ٧٥ ـ ١٥٠ لفة/ دقيقة. وتحتاج الأذرع «الروبوتية» والنهايات الطرفية «للروبوتات» بالإضافة للمنظومات الميكانيكية الفرعية.. إلى محركات بسرعات اقل من ٢٠ لفة / دقيقة. وفى بعض الاحيان.. يفضل استخدام محرك لوصلة الكتف بالأذرع «الروبوتية» بسرعة ٥ أو٨ لفات فى الدقيقة. يمكن إنقاص سرعة المحرك باستخدام صناديق التروس كما هو الحال فى السيارات والدراجات وأجهزة التسجيل والغسالات والمجففات. تؤدى التروس مهمتين أساسيتين.. جعل مسافة الانتقال فى أحد التروس أكبر من الترس الآخر المتلامس معه.. وزيادة أو تقليل القدرة طبقًا لوضع التروس. يمكن استخدام التروس أيضاً فى نقل القدرة من مكان الى آخر.. ودائما تقل السرعة عند الانتقال من الترس الأصغر إلى الأكبر والعكس. يمكن إنقاص سرعة محرك من ١٠٠٠ إلى ٥٠ لفة/ دقيقة على خطوات باستخدام المنظومة الموضحة بالشكل رقم (٤)..

يذكر.. أنه يمكن شراء محرك تيار مستمر يحتوى على صندوق تروس لتقليل السرعة مما يوفر البحث عن صندوق تروس مناسب وتثبيته فى المحرك..

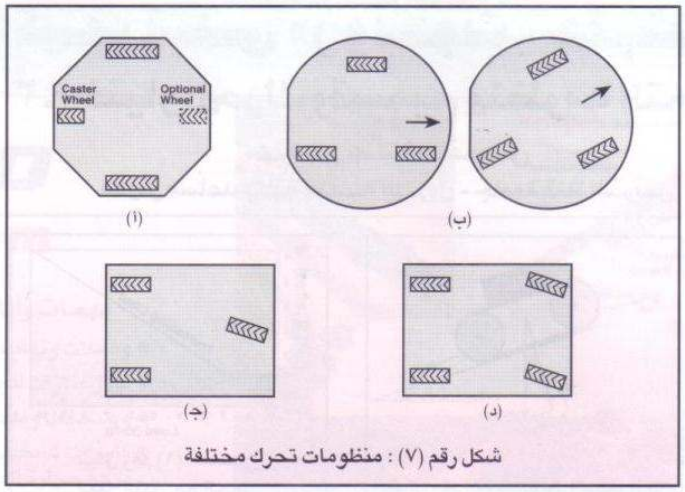
منظومات التحرك Locomotion Systems

تعتبر وحدة الحركة من أثقل الوحدات المكونة «للروبوت» بعد البطارية. لذا.. يجب العناية باختيار مكان تثبيت هذه الوحدة بحيث يتم توزيع الوزن على قاعدة «الروبوت». توجد ثلاث منظومات تحرك شائعة الاستخدام.. (العجلات Wheels – المسارات Tracks – السيقان Legs). تتميز منظومة التحرك الأولى ببساطة التركيب الميكانيكى مما يجعلها أكثر استخدامًا فى تصميم «الروبوتات» الجوالة.. إلا أنه يعيبها عدم قدرتها على التجوال فى الأماكن غير الممهدة حيث تواجه مشكلة فى الحركة إذا كان ارتفاع العائق قريباً من قطر العجلة.

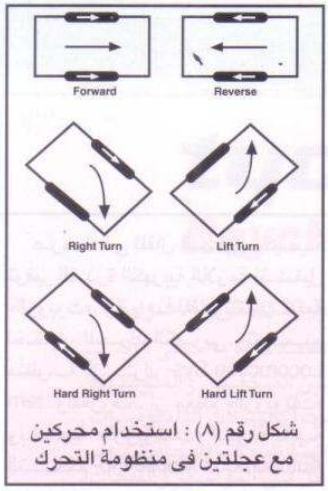
أما منظومتا التحرك الثانية والثالثة فتحتاجان إلى تجهيزات ميكانيكية أكثر تعقيداً مقارنة بالمنظومة الأولى. وتتيح منظومة التحرك باستخدام المسار.. إمكانية العمل فى بيئات غير ممهدة ولكن يعيبها انخفاض الكفاءة لوجود احتكاك بين وحدات مسار الحركة الميكانيكى الذى يسبب فقداً فى القدرة.. ومن أشهر تطبيقاتها.. «روبوت» الجمعية الجغرافية الأمريكية الذى استخدم مؤخراً فى محاولة استكشاف هرم خوفو – شكل رقم (٥).

أما منظومات التحرك التى تعتمد على وجود سيقان حركة Legs.. فمن أشهرها «الروبوت» Genhis الذى تم بناؤه فى معهد MIT الأمريكى ـ شكل رقم (٦) ـ ويتميز بالقدرة على العمل فى البيئات الصعبة بكفاءة أعلى من «روبوتات» المسار. وتتمتع هذه «الروبوتات» بتعدد درجات حرية الحركة.. إذ أن كل ساق يجب أن تحتوى على محركين على الأقل الأمر الذى يتطلب برمجة معقدة وتكاليف باهظة.

وسوف نركز هنا على منظومات التحرك باستخدام العجلات لسهولة تركيبها الميكانيكى وانخفاض تكلفتها وشيوع استخدامها. وتختلف أنواعها طبقاً لعدد المحركات المستخدمة فى بناء المنظومة وآلية التشغيل.



شكل رقم (٧) : منظومات تحرك مختلفة



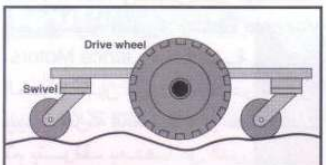
شكل رقم (٨) : استخدام محركين مع عجلتين فى منظومة التحرك

منظومات التحرك باستخدام العجلات

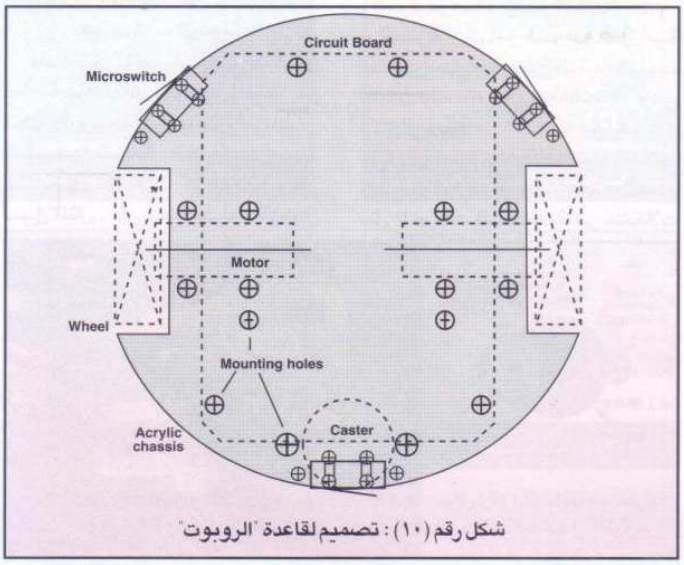
١ ـ المحرك التفاضلى Differential Drive:

يعتبر المحرك التفاضلى أقل منظومات التحرك تعقيداً من ناحية التركيب والبرمجة حيث يعتمد على استخدام محركين كما هو موضح بالشكل رقم (٧ – أ). وتستخدم معظم التصميمات محركين لتحريك عجلتين يمكن بهما توفير حركة أمامية وخلفية كما بالشكل رقم (٨).

وبالتحكم فى قيمة وقطبية الجهد المغذى لكل محرك.. يمكن التحكم فى قيمة واتجاه كمية الحركة Momentum كما هو موضح فى الجدول رقم (١)

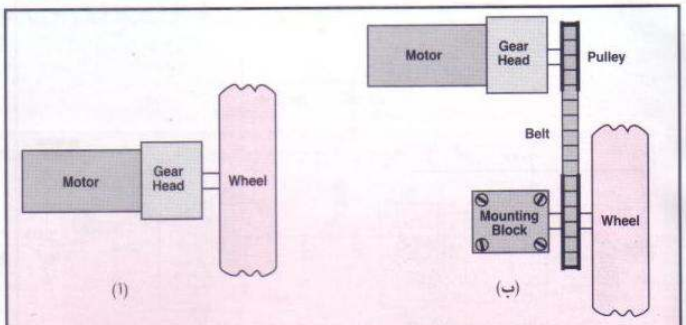


شكل رقم (٩) : "روبوت" بعجلتين محوريتين على سطح متعرج



شكل رقم (١٠) : تصميم لقاعدة "الروبوت"

الجهد	القطبية	نوع الحركة	اتجاه الحركة
$V_2 = V_1$	موجب	انتقالية	أمامية
$V_2 < V_1$	موجب	دورانية	مع عقارب الساعة
$V_2 > V_1$	موجب	دورانية	عكس عقارب الساعة
$V_2 = V_1$	سالب	انتقالية	خلفية
$V_2 < V_1$	سالب	دورانية	عكس عقارب الساعة
$V_2 > V_1$	سالب	دورانية	مع عقارب الساعة



شكل رقم (١١) : توصيل محور إدارة المحرك

بفرض أن V_1 هو جهد المحرك الأيمن و V_2 هو جهد المحرك الأيسر.

ويراعى فى هذه المنظومة استخدام عجلة محورية بدون محرك Caster Wheel لتحقيق الاتزان.. كما يمكن استخدام عجلتين محوريتين لتوزيع وزن المركبة بانتظام على قاعدة «الروبوت». وفى حالة استخدام عجلتين محوريتين.. يمكن «للروبوت» أن يفقد القدرة على الحركة إذا تعرض لسطح كالموضح بالشكل رقم (٩). ويوضح الشكل رقم (١٠) تصميمًا مقترحًا لقاعدة «الروبوت».

٢ـ المحرك التزامنى Asynchronous Drive:

تعتمد آلية تشغيل هذه المنظومة على وصل كل عجلات المركبة بشكل يؤدى إلى تحرك تزامنى لها فى نفس الاتجاه دائماً ـ شكل رقم (٧ـ ب). ولتغيير اتجاه الحركة.. يتم تدوير كل عجلات المركبة فى نفس الوقت حول محور رأسى. يعيب هذا النوع صعوبة التركيب الميكانيكى وارتفاع التكلفة .

٣ـ المحرك ثلاثى العجلات ومحرك السيارة Tricycle and Car Drive :

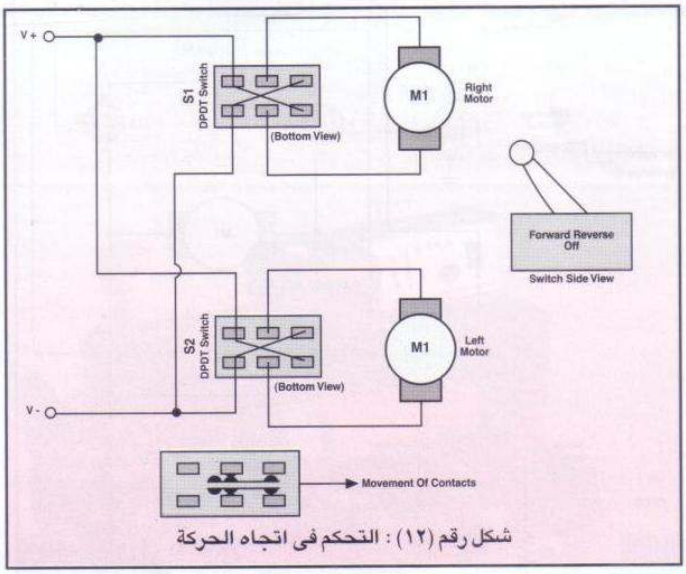
يوضح الشكلان رقما (٧ـ جـ)، (٧ ـ د) محرك ثلاثى العجلات ومحرك السيارة على الترتيب. تتمتع كلتا المنظومتين بدرجة عالية من الاتزان.. ويوصى باستخدام منظومة المحرك التفاضلى فى بناء «الروبوت» الشخصى نظراً لسهولة تركيبها الميكانيكى وانخفاض تكلفتها بالمقارنة بالأنواع الأخرى.

ـ ثبيت المحرك:

تحتوى بعض المحركات على تجهيزات تسهل تثبيتها فى هيكل «الروبوت». وفى حالة عدم وجود هذه التجهيزات يمكن استخدام احزمة على شكل حرف U تسمى U- bolts وعمل صندوق خشبى لمنع قاعدة المحرك من الانزلاق.

ـ توصيل محور إدارة المحرك:

يعتبر توصيل محور دوران المحرك Shaft بصندوق التروس والإطارات وذراع التشغيل أو الأجزاء الميكانيكية الأخرى من أصعب المهام.. وذلك لاحتمالات اختلاف مقاس المحور عن مقاس الترس مثلاً ولأهمية ضبط الاستقامة الطولية بين المحاور. هناك طريقتان لتوصيل محور إدارة المحرك بالعجلة كما يوضحهما الشكل رقم (١١). فى الطريقة الأولى (أ) يتم ربط العجلة مباشرة بمحور إدارة صندوق التروس.. أما فى الطريقة الثانية (ب) فتكون التروس معزولة عن العجلة بواسطة سير. وبالرغم من سهولة الطريقة الأولى فإن وزن «الروبوت» يتم تحميله فيها على عامود إدارة صندوق التروس.



شكل رقم (١٢) : التحكم فى اتجاه الحركة

التحكم فى التشغيل واتجاه الحركة

تعتمد سرعة ترحال «الروبوت» Travel Speed على سرعة المحركات بالإضافة إلى قطر العجلات.. حيث أن سرعة الترحال هى حاصل ضرب السرعة الدورانية فى محيط العجلة. وفى معظم التطبيقات.. يجب ألا تتجاوز سرعة المحرك ١٣٠ لفة/ دقيقة والمحرك فى حالة تحميل. وفى حالة استخدام عجلات بقطر متوسط.. تكون سرعة الترحال فى حدود ٤,٣٩كم/ ساعة وهى تعتبر سرعة كبيرة.. ولذلك يوصى بألا تزيد السرعة عن ٢كم/ ساعة اختيار محركات أبطأ وعجلات بقطر أصغر.

١ـ التحكم باستخدام مفتاح عكس القطبية DPDT:

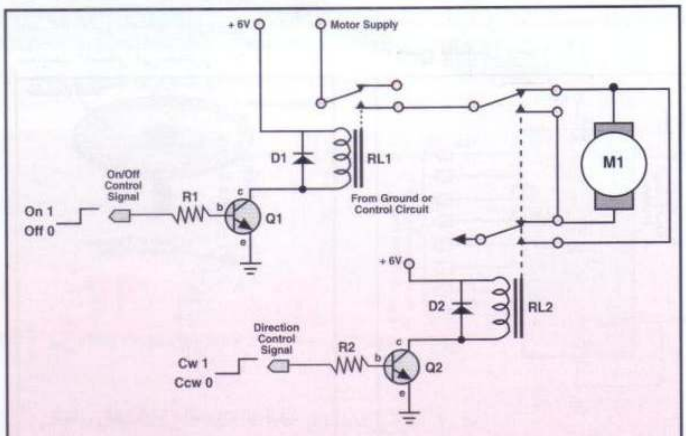
نظرًا لتميز محركات التيار المستمر بسهولة تغيير اتجاه الحركة.. فإنه يمكن عكس الاتجاه بواسطة عكس قطبية مصدر القدرة الكهربية المغذى للمحرك وذلك باستخدام مفتاح عكس القطبية DPDT كالموضح فى دائرة مصدر القدرة فى المقال السابق. وللتحكم فى اتجاه حركة المحركين.. يمكن استخدام مفتاحى عكس قطبية كما هو موضح فى الشكل رقم (١٢).

٢ ـ التحكم باستخدام المرحلات Re-lay Control:

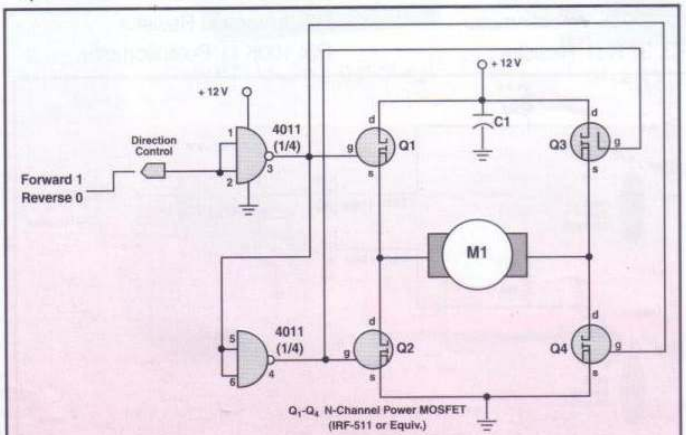
تستخدم هذه الطريقة للتحكم فى تشغيل المحرك ON/OFF Control. وللتحكم فى اتجاه الحركة.. يمكن استخدام مفتاح عكس قطبية DPDT. يوضح الشكل رقم (١٣) دائرة مرحل التحكم فى التشغيل مع إمكانية عكس اتجاه الحركة.

٣ ـ التحكم باستخدام Power MOS-FET:

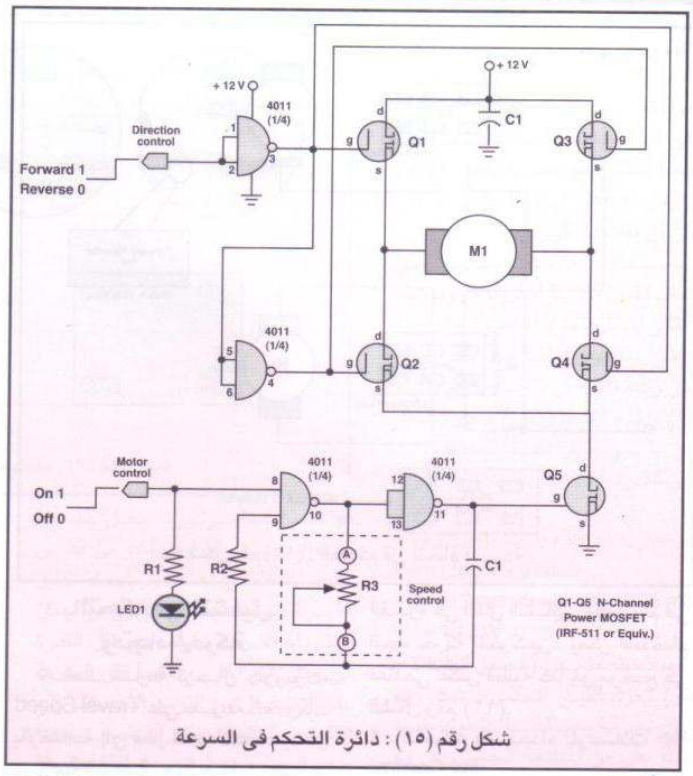
يعتبر IRF - 511 من أكثر أنواع Power MOSFET استخداماً لتميزه بإمكانية العمل مع مقننات تيار مختلفة بشرط توفير تبريد مناسب باستخدام Heat Sink. يوضح الشكل رقم (١٤) دائرة التحكم باستخدام Power MOS-FET والتى تعتمد على استخدام البوابات المنطقية Logic Gates فى التحكم فى



شكل رقم (١٣) : دائرة المرحل



شكل رقم (١٤) : Power MOSFET



شكل رقم (١٥) : دائرة التحكم فى السرعة

تشغيل المحرك. وفى هذه الدائرة:

Q1 - Q4: IRF511(or equiv.) Power MOSFET.

U1: 4011 CMOS Quad NAND Gate IC .

التحكم فى السرعة
Speed Control

للحصول على سرعات مختلفة «للروبوت».. يمكن استغلال دائرة التحكم فى التشغيل باستخدام Power MOSFET الموضحة بالفقرة السابقة فى تصميم دائرة التحكم فى السرعة كالموضحة بالشكل رقم (١٥).. وتشمل:

Q1-Q4:IRF511 (or equiv.) power MOSFET.

U1: 4011 CMOS Quad NAND Gate IC.

R1: 330 Ω Resistor.

R2: 1 mega Ω Resistor

R3: 100K Ω Potentiometer.

C1:0.033 µf Ceramic Capacitor.

LED1: Light Emitting Diode.

(All Resistors 5 or 10% tolerance, 1/4 Watt - all capacitors 10% tolerance, rated 35 volts or higher).

وتوفر هذه الدائرة تحكماً مفتوحاً على سرعة «الروبوت» Open Loop Control حيث لا توجد تغذية مرتدة Feedback لبيان العلاقة بين السرعة الحالية «للروبوت» والسرعة المطلوبة. لذا.. يمكن تحسين الأداء باستخدام تحكم الدائرة المغلقة Closed Loop Control حيث يعتمد تشغيل الدائرة على قيمة الخطأ وهو الفرق بين السرعة الحالية والسرعة المطلوبة.

يوضح الشكل رقم (١٦) تصميماً لدائرة تحكم مغلق تشمل:

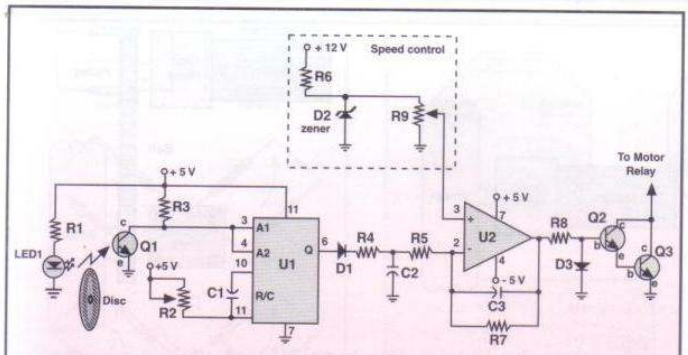
U1:74121 Monostable Multivibrator.

U2 : LM741 Op Amp IC.

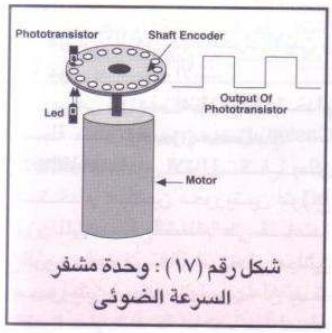
R1: 220 Ω Resistor.

R2: 5K Ω Potentiometer.

R3: 37 K Ω Resistor .



شكل رقم (١٦) : دائرة تحكم مغلق



شكل رقم (١٧) : وحدة مشفر السرعة الضوئى

R4, R5: 2.2K Ω Resistor.

R6: 330 Ω Resistor.

R7: 470 K Ω Resistor.

R8: 150 Ω Resistor.

R9: 10K Ω 10 -Turn Precison Potentiometer.

C1 : 2.2 µf Tantalum Capacitor.

C2 : 0.1 µf Ceramic Capacitor.

DI,D3 : 1N914 Signal Diode.

D2 : 5.1 volt -1 watt Zener Diode.

Q1:Infrared Sensitive Phototransistor.

Q2 : 2N2222 NPN Transistor.

Q3: 2N3055 NPN Power Transistor.

LED1:Infrared Light Emitting Diode.

Misc.: Heat Sink for 2N3055 Transistor, Infrared Filter for Phototransistor (if needed), Shaft Encoder.

(A11 resistor 5 or 10% tolerance, 1/4 watt - all capacitors 10% tolernce, rated 35 volts or higher).

تستخدم فى هذه الدائرة وحدة مشفر أو Shaft Encoder كما هو موضح بالشكل رقم (١٧) وذلك لتحويل سرعة عامود الإدارة إلى إشارة كهربية لتمويل التغذية المرتدة.

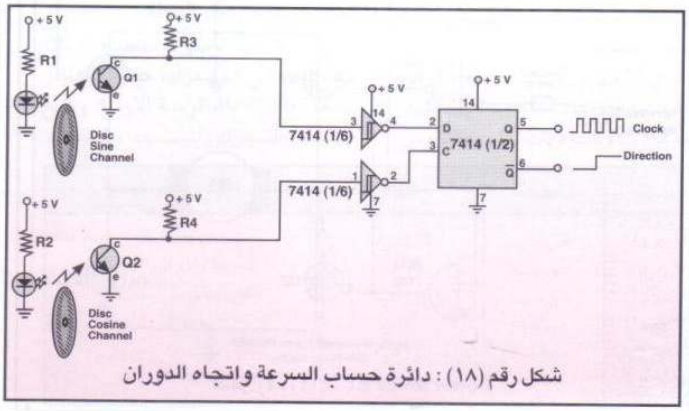
ـ حساب مسافة الترحال
:Distance of Travel

يمكن استخدام مشفرات سرعة المحور Shaft Encoder فى حساب المسافة التى يقطعها «الروبوت» بدلاً من تثبيت المشفر فى محور المحرك بحيث يتم تركيبه على محور العجلة وذلك فى حالة اختلاف المحورين. تحدد الثقوب الموجودة على قرص المشفر الدقة القصوى لدائرة حساب المسافة.. بمعنى أنه بزيادة عدد الثقوب تزداد دقة الدائرة.

وإذا افترضنا أن القرص يحتوى على ٥٠ ثقبًا موزعة على محيطه.. تكون أقل مسافة يمكن للقرص الاحساس بها هى ٧,٥°. وبدوران العجلة.. يتم إرسال اشارة الى دائرة العد كل ٧,٥° باستخدام وحدتين من الترانزستورات الضوئية.

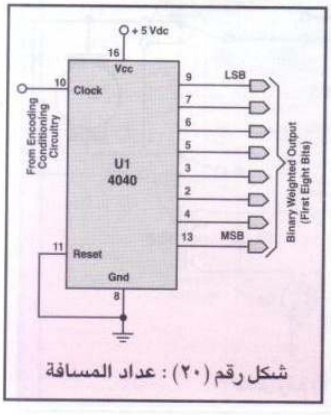
يمكن حساب سرعة واتجاه العجلة باستخدام الدائرة الموضحة بالشكل رقم (١٨) وفيها يستخدام ٢ دايود مشع LED بالإضافة إلى ٢ ترانزستور ضوئى يتم تثبيتها كما هو موضح بالشكل رقم (١٩).

بحساب عدد النبضات الموجودة فى إشارة السرعة المتولدة فى الدائرة السابقة.. يمكننا معرفة المسافة التى قطعها «الروبوت».. باستخدام العداد الموضح بالشكل رقم (٢٠).



شكل رقم (١٨) : دائرة حساب السرعة واتجاه الدوران

شكل رقم (١٩) : تثبيت الدايود والترانزستور



شكل رقم (٢٠) : عداد المسافة