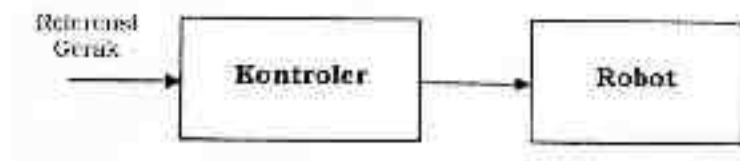


1.1 Sistem Kontrol Robotik

Sistem kontrol robotik pada dasarnya terbagi dua kelompok, yaitu sistem kontrol loop terbuka(open loop) dan loop tertutup (close loop).

Diagram kontrol loop terbuka pada sistem robot dapat dinyatakan dalam gambar 1.13 berikut ini.

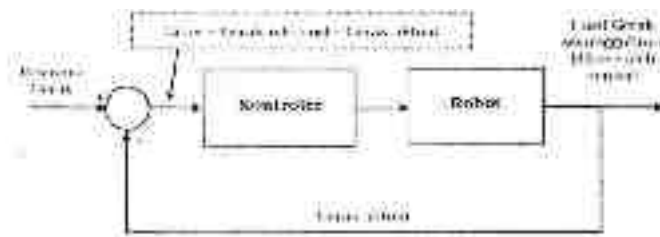


Gambar 1.13 Kontrol robot loop terbuka

Kontrol loop terbuka atau umpan maju (feedforward control) dapat dinyatakan sebagai sistem kontrol yang outputnya tidak diperhitungkan ulang oleh kontroler. Keadaan apakah robot benar-benar telah mencapai target seperti yang dikehendaki sesuai referensi, adalah tidak dapat mempengaruhi kinerja kontroler. Kontrol ini sesuai untuk sistem operasi robot yang memiliki aktuator yang beroperasi berdasarkan umpan logika berbasis konfigurasi langkah sesuai urutan, misalnya stepper motor. Stepper motor tidak perlu dipasang sensor pada porosnya untuk mengetahui posisi akhir. Jika dalam keadaan berfungsi dengan baik dan tidak ada masalah beban lebih maka stepper motor akan berputar sesuai dengan perintah kontroler dan mencapai posisi target dengan tepat.

Perlu di garis bawahi disini bahwa kontrol sekuensi (urutan) dalam gerak robot dalam suatu tugas yang lengkap, misalnya memiliki urutan sebagai berikut: menuju ke posisi obyek, mengangkat obyek, memindahkan obyek ke posisi tertentu, dan meletakkan obyek adalah tidak selalu semua langkah operasi ini termasuk dalam kontrol loop terbuka. Dapat saja langkah menuju posisi obyek dan memindahkan obyek menuju posisi akhir adalah gerak berdasarkan loop tertutup. Sedangkan yang lainnya adalah loop terbuka berdasarkan perintah langkah berbasis delay.

Kontrol robot loop tertutup dapat dinyatakan seperti dalam Gambar 1.14.



Gambar 1.14 Kontrol robot loop tertutup

Pada gambar di atas, jika hasil gerak aktual telah sama dengan referensi maka input kontroler akan nol. Artinya kontroler tidak lagi memberikan sinyal akurasi kepada robot karena target akhir perintah gerak telah diperoleh. Makin kecil error terhitung maka makin kecil pula sinyal pengemudian kontroler terhadap robot. Sampai akhirnya mencapai kondisi tenang (steady state).

Referensi gerak dan gerak aktual dapat berupa posisi (biasanya didefinisikan melalui kedudukan ujung lengan terakhir/end of effector), kecepatan, akselerasi, atau gabungan di antaranya. Kontrol bersifat konvergen jika dalam rentang waktu pengontrolan nilai error menuju nol, dan keadaan dikatakan stabil jika setelah konvergen kontroler mampu menjaga agar error selalu nol. Dua pengertian dasar; konvergen dan stabil, adalah sangat penting dalam kontrol loop tertutup. Stabil dan konvergen diukur dari sifat referensinya. Posisi akhir dianggap konvergen bila makin lama gerakan makin perlahan dan akhirnya diam pada posisi seperti yang dikehendaki referensi, dan dikatakan stabil jika posisi akhir yang diam ini dapat dipertahankan dalam masa-masa berikutnya. Jika referensinya adalah kecepatan maka disebut stabil jika pada keadaan tenang kecepatan akhirnya adalah sama dengan referensi (atau mendekati) dan kontroler mampu menjaga 'kesamaan' ini pada masa-masa berikutnya. Dalam hal kecepatan, keadaan tenang yang dimaksud adalah bukan berarti output kontroler bernilai nol (tegangan nol Volt) seperti keadaan sesungguhnya pada kontrol posisi, namun kontroler tidak lagi memberikan penguatan (amplify) atau pelemahan (attenuate) pada aktuator. Demikian juga bila referensinya adalah percepatan (akselerasi). Pembahasan yang lebih detail

tentang hal ini diterangkan melalui contoh-contoh praktis di Bab-bab berikutnya.

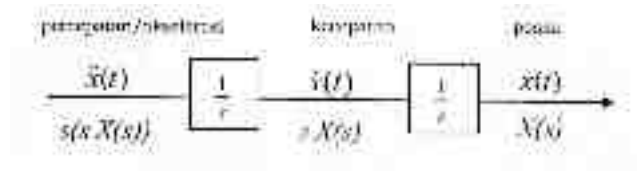
1.1.1 Sekilas tentang penggunaan Transformasi Laplace

Mendalami kontrol robotik secara teoritis memerlukan dasar-dasar pemahaman tentang sistem sinyal. Semua gerakan yang diasumsikan sebagai visualisasi operasi robot berbasis waktu yang berjalan dapat dinyatakan sebagai fungsi sinyal. Artinya, karakteristik input(referensi), sistem kontroler, sistem dikontrol, dan output dapat dinyatakan dalam persamaan matematik yang merepresentasikan sifat atau respon terhadap perubahan waktu.

Transformasi Laplace adalah salah satu metoda untuk menyatakan persamaan sinyal dalam fungsi waktu. Metoda ini sangat berguna dalam analisa sinyal untuk kontrol robotik selain metode baku yang lain(representasi Fourier, dan transformasi Z). Bentuk dasar ekspresi matematikanya adalah sebagai berikut.

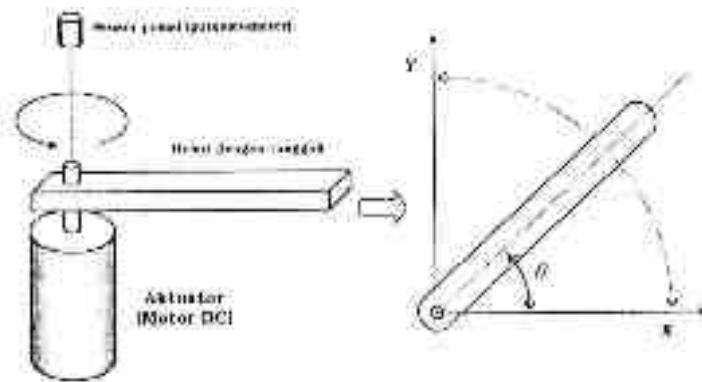
$$L\{f(t)\} = \int_0^{\infty} f(t)e^{-st} dt \quad (1.1)$$

Dengan pendekatan ini jika $L\{x(t)\} = X(s)$ dengan asumsi nilai pada kondisi awal adalah nol, maka $L\{\dot{x}(t)\} = sX(s)$. Demikian juga maka $L\{\ddot{x}(t)\} = s^2X(s)$. Jika $x(t)$ adalah fungsi dari posisi, $\dot{x}(t)$ adalah kecepatan, dan $\ddot{x}(t)$ adalah percepatan maka penggunaan transformasi Laplace untuk menyatakan hubungan ini dapat diilustrasikan seperti dalam Gambar 1.16 berikut ini.



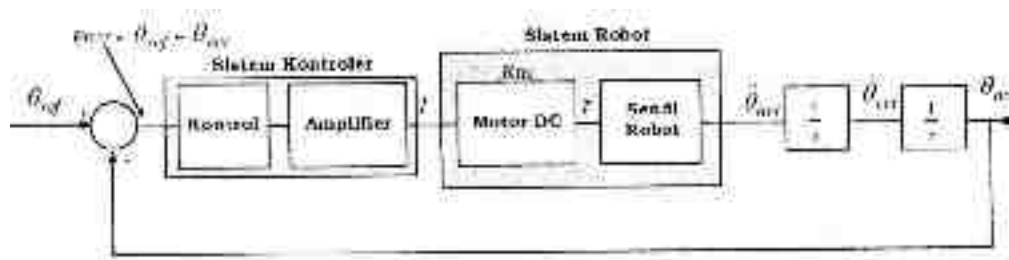
Gambar 1.15 Penggunaan transformasi Laplace

Sebagai contoh kita bahas sebuah robot lengan yang memiliki lengan tunggal atau satu sendi. Aktuornya adalah sebuah motor DC sedang sensornya adalah potensiometer. Ilustrasinya diberikan dalam Gambar 1.17 berikut ini.



Gambar 1.16 Robot Tangan Satu Sendi

Robot diatas dapat dikontrol berdasarkan posisi, kecepatan dan percepatan. Di sebelah kanan gerakan lengan diilustrasikan dapat membentuk gerakan searah dan berlawanan dengan jarum jam. Posisi gerakan dinyatakan oleh θ . Diagram kontrolnya dapat dinyatakan seperti gambar 1.17 berikut ini.



Gambar 1.17 Diagram Kontrol Robot Tangan Satu Sendi

Dalam gambar, θ_{ref} adalah posisi referensi (dalam radian), θ_{act} adalah posisi aktual, I adalah arus motor. K_m adalah konstanta motor, τ adalah torsi yang dihasilkan poros motor, $\ddot{\theta}_{act}$ adalah percepatan sudut aktual, $\dot{\theta}_{act}$ adalah kecepatan sudut aktual, dan θ_{act} adalah posisi aktual.

Gambar 1.17 diatas sebenarnya tidak berbeda dengan ilustrasi pada gambar 1.14. Blok kontroler pada gambar 1.14 dinyatakan sebagai sistem kontroler pada Gambar 1.17 dapat memberikan penjelasan yang lebih rinci tentang fenomena kontrol yang sesungguhnya terjadi. Pemberian torsi oleh motor pada lengan robot memberikan dampak dinamik pada percepatan sudut, kecepatan sudut dan posisi ujung lengan robot sekaligus.

Dalam aplikasi yang sebenarnya pernyataan pada Gambar 1.17 memberikan pengertian bahwa output dari sistem robot (putaran sudut pada poros atau sendi lengan dapat dibaca dalam tiga parameter , yaitu percepatan, kecepatan dan posisi. Namun tiga parameter ini tidak selalu diakomodasikan dengan pemasangan sensor yang bersesuaian. Jika sensor yang tersedia adalah sensor posisi saja maka kecepatan dapat diperoleh dengan mengintegrasikan bacaan posisi terhadap waktu sebagai berikut.

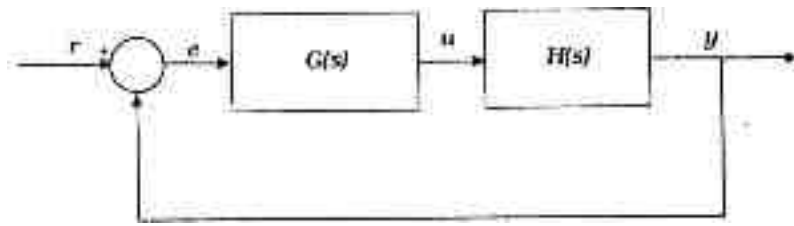
$$\theta_{avg} = \frac{\Delta \theta}{\Delta t} \quad (1.2)$$

Demikian juga, percepatan dapat diperoleh dengan mengintegrasikan bacaan atau perhitungan kecepatan terhadap waktu,

$$\theta_{avg} = \frac{\Delta \theta}{\Delta t} \quad (1.3)$$

1.1.2 Kontrol Proporsional, Integral dan Derivatif

Kembali pada gambar 1.14. Sekarang akan kita gambar ulang dalam bentuk pernyataan standar dalam sistem kontrol seperti dalam gambar 1.18. dalam gambar, r adalah input, e adalah error , u adalah sinyal output kontroler, $G(s)$ adalah kontroler, $H(s)$ adalah dinamik robot, dan y adalah output. Sekarang permasalahannya adalah bagaimana $G(s)$ didesain.



Gambar 1.18 Kontrol robot loop tertutup

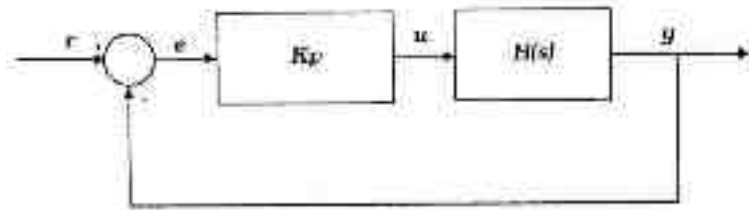
Kontrol Proporsional (Proportional control, P)

Kontroler adalah kontrol P jika $G(s) = k$, dengan k adalah konstanta.

Jika, $u = G(s).e$ maka

$$u = K_p.e$$

dengan K_p adalah konstanta proporsional. K_p berlaku sebagai Gain (penguat) saja tanpa memberikan efek dinamik kepada kinerja kontroler. Dengan demikian gambar 1.18 dapat dinyatakan ulang sebagai berikut,



Gambar 1.19 Kontrol Proporsional, P

Penggunaan kontrol p memiliki berbagai keterbatasan karena sifat kontrol yang tidak dinamik ini. Walaupun demikian dalam aplikasi-aplikasi dasar yang sederhana kontrol P ini cukup mampu untuk mencapai konvergensi meskipun error keadaan tenangnya (steady-state error) relatif besar. Sebagai materi pembelajaran, kontrol P dianggap sangat baik untuk permulaan.

Kontrol Integral (Integral Control, I)

Jika $G(s)$ adalah kontrol I maka u dapat dinyatakan sebagai

$$u(t) = \left[\int_0^t e(T) dT \right] Ki \quad (1.5)$$

, Ki adalah konstanta integral

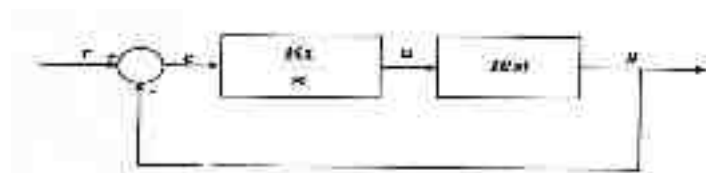
Dari persamaan (1.5) , $G(s)$ dapat dinyatakan sebagai,

$$G(s) = \frac{Ki}{s}$$

Jika $e(T)$ mendekati konstan (bukan nol maka $u(t)$ kan menjadi sangat besar sehingga diharapkan dapat memperbaiki error . Jika $e(T)$ mendekati nol maka efek kontrol I ini semakin kecil.

Kontrol I dapat memperbaiki respon steady-state. Namun pemilihan Ki yang tidak tepat dapat menyebabkan respon transien (transient response) yang tinggi sehingga dapat menyebabkan ketidakstabilan sistem. Pemilihan Ki yang sangat tinggi justru dapat menyebabkan output berosilasi.

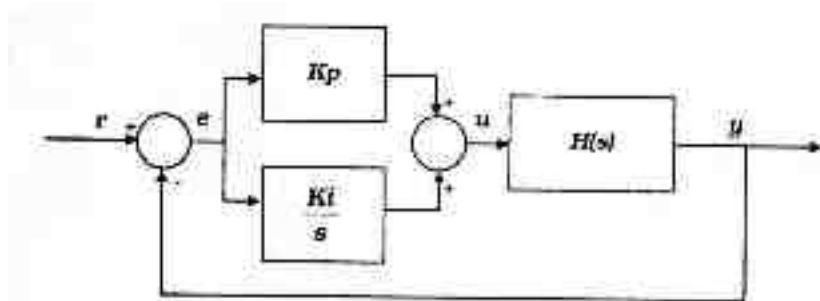
Diagram kontrol I dapat diilustrasikan sebagai berikut,



Gambar 1.20 Kontrol Integral,I

Kombinasi kontrol P dan I

Dengan sifat dasar kontrol P yang cenderung konvergen dan I yang dapat memperbaiki respon steady-state maka kombinasi P-I dapat memberikan hasil yang lebih baik. Dalam diagram blok dapat dinyatakan sebagai berikut.



Gambar 1.21 Kontrol Proporsional-Integral, P-I

Dari gambar 1.21 di atas, persamaan kontroler $G(s)$ dapat dinyatakan sebagai berikut,

$$G(s) = K_p + \frac{K_i}{s} \quad (1.7)$$

atau

$$G(s) = \frac{sK_p + K_i}{s} \quad (1.8)$$

Kontrol Derivatif (Derivative Control, D)

Sinyal kontrol u yang dihasilkan oleh kontrol D dapat dinyatakan sebagai,

$$u = K_d \dot{e} + \dot{r} \quad (1.9)$$

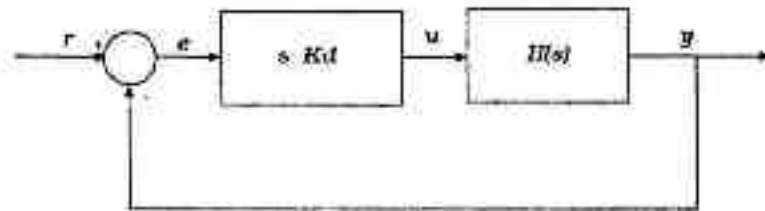
atau

$$u = K_d \cdot \frac{\Delta e}{\Delta t} \quad (1.10)$$

Sehingga $G(s)$ dapat dinyatakan,

$$G(s) = s \cdot K_d \quad (1.11)$$

Dari persamaan (1.9) , nampak bahwa sifat dan kontrol D ini bermain dalam konteks "kecepatan" atau rate dari error. Dengan sifat ini ia dapat digunakan untuk memprediksi error yang akan terjadi . umpan balik yang diberikan adalah sebanding dengan kecepatan perubahan $e(t)$ sehingga kontroler dapat mengantisipasi error yang akan terjadi. Dalam blok diagram dapat dinyatakan sebagai berikut,



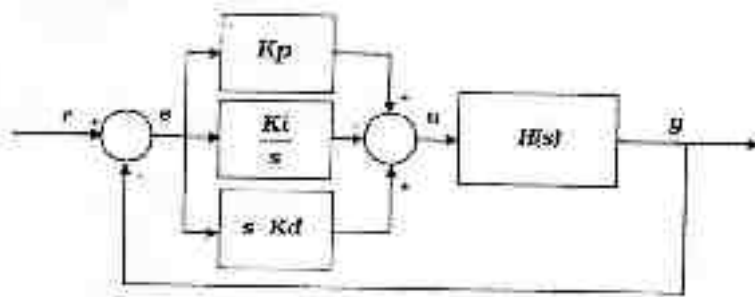
Gambar 1.22 Kontrol derivatif, D

Kombinasi kontrol P,I dan D

Diagram kombinasi ketiga kontrol klasik yang diterangkan di atas dapat dinyatakan seperti dalam gambar 1.23. Dengan menggabungkan kontrol P,I dan D maka masing-masing kelebihanannya dapat disatukan untuk mendapatkan kontrol yang ideal.

Namun demikian, suatu sistem kontrol klasik kombinasi , baik PI ataupun PID, hanya dapat bekerja baik untuk sistem $H(s)$ yang cenderung linier dalam

fungsi waktu. Artinya , persamaan dinamik dari model $H(s)$ yang cenderung linier dalam fungsi waktu. Artinya , persamaan dinamik dari model $H(s)$ relatif tidak berubah selama rentang waktu pengontrolan. Padahal kenyataannya , tidak ada fenomena sistem riil yang benar-benar linier . bahkan hampir semua fenomena kontrol mulai dari skala , misalnya kontrol motor DC, hingga skala sistem besar , misalnya kontrol pesawat terbang tanpa awak , jika dilakukan permodelan secara rinci dan lengkap adalah sangat tidak linier (non linier). Setiap sistem riil selalu berhadapan dengan gangguan (disturbance). Motorselalu bermasalah dengan friksi pada poros , gerabok , perubahan karakteristik karena temperatur, dll. Pesawat diudara selalu berhadapan dengan tekanan udara yang berubah-ubah,angin,hujan , dsb



Gambar 1.23 Kontrol PID

Untuk kontrol klasik ini , yang dapat dilakukan oleh engineer hanyalah melakukan pendekatan atau asumsi model sistem secara linier dengan mengabaikan faktor-faktor nonlinier yang dianggap terlalu sulit untuk dimodelkan secara matematik. Sehingga K_p , K_i dan K_d yang dipilih (tuned) adalah yang dianggap paling tepat (optimum) untuk kondisi ideal model.