

CORSO DI SISTEMI DINAMICI
A.A. 2019/2020

11 novembre 2019

Homework 1

Modalità di consegna: invio a mezzo di posta elettronica di un documento in formato *pdf* e dell'eventuale codice Matlab agli indirizzi *t.parisini@gmail.com*, *fenu@units.it*, *fapellegrino@units.it*. Il messaggio dovrà avere per oggetto: *[SD20192020] HW1 Nome Cognome*. In caso di lavori di gruppo, il documento dovrà riportare i nomi di tutti gli elementi del gruppo. In caso di invio di codice Matlab, esso potrà essere contenuto in una cartella compressa. Il documento *pdf* invece NON dovrà essere compresso (ad esempio, Allegato 1: *HW1 NomeCognomeRelazione.pdf*, Allegato 2: *HW1 NomeCognomeCodice.zip*).

Termine suggerito per la consegna: 31 dicembre 2019.

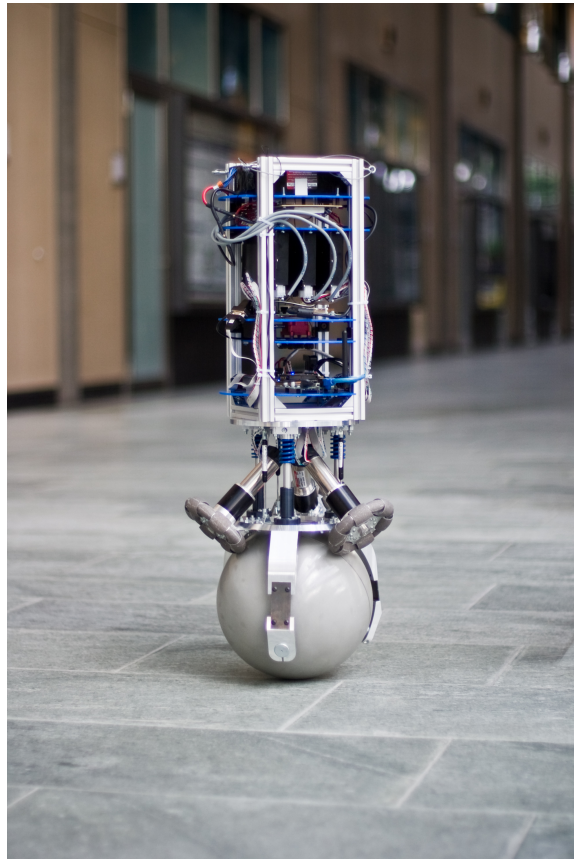


Figura 1: *Ballbot* Rezero [ETHZ-Rezero] senza rivestimento esterno, in posizione di equilibrio in quiete.

Esercizio 1: modello planare di un *ballbot*

1 Introduzione

Per *ballbot* si intende una piattaforma robotica mobile progettata in modo da stare in equilibrio su di un'unica ruota sferica (come in Fig. 1). La ruota sferica viene azionata da diversi motori (elettrici di solito), permettendo così al *ballbot* di muoversi agilmente in ogni direzione sul suolo, come se fosse una specie di pendolo inverso capace di muoversi facendo rotolare la base in qualsiasi direzione nel piano.

Negli anni sono stati studiati e sviluppati diversi prototipi di *ballbot*, tra i quali quello della Carnegie Mellon University, CMU *Ballbot*, evolutosi negli anni a partire dal 2006 [Lauwers et al., 2006, Nagarajan et al., 2014, Seyfarth, 2016], il progetto BallIP [Masaaki Kumagai and Takaya Ochiai, 2008], il progetto Rezero del ETH Zurigo [Fankhauser and Gwerder, 2010, ETHZ-Rezero] e quello della Universidad de Alcalá (Spagna), basato su LEGO Mindstorms [Prieto et al., 2012].

2 Modello planare di un *ballbot*

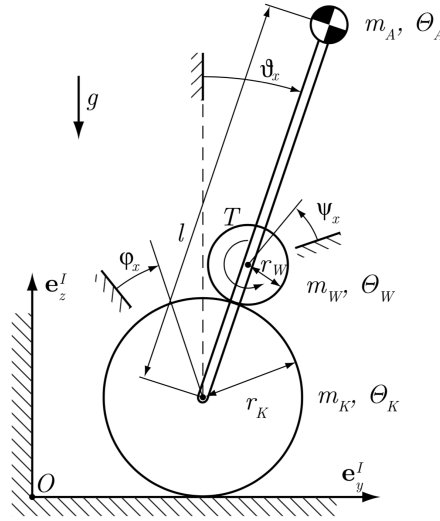


Figura 2: Modello semplificato planare di un *ballbot* (tratto da [Fankhauser and Gwerder, 2010, cap. 2])

Facendo riferimento alla pubblicazione [Fankhauser and Gwerder, 2010] ed in particolare al capitolo 2, si richiede di

- individuare una **descrizione in equazioni di stato a tempo continuo** per il sistema in Fig. 2, sfruttando l'analisi a disposizione in [Fankhauser and Gwerder, 2010], in particolare nel capitolo 2 e nella appendice B.

Il sistema in Fig. 2 descrive un modello semplificato di un *ballbot*: è consuetudine infatti semplificare lo studio iniziale del modello dinamico di un *ballbot*, supponendo che il sistema sia costituito da 3 parti planari (come in Fig. 3), ciascuna delle quali permette di descrivere agevolmente i movimenti del *ballbot* nel piano corrispondente a ciascun modello. Il sistema di propulsione viene modellato come una ruota attuata in ciascuno dei piani di rotazione considerati.

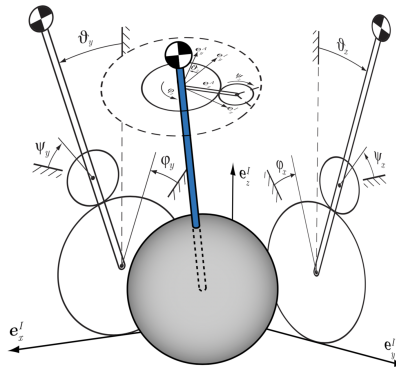


Figura 3: I 3 modelli planari per un *ballbot* (tratto da [Fankhauser and Gwerder, 2010, cap. 2])

- Il modello richiesto descrive in modo equivalente rotazioni e traslazioni nei piani (y, z) oppure (x, z) (cfr. Fig. 3), assumendo inoltre che

- non ci sia alcun accoppiamento tra i 3 modelli planari;
 - nessuno scivolamento né tra palla e suolo, né tra ruota attuata e palla;
 - attrito trascurabile e nessuna deformazione;
 - i motori abbiano una dinamica sufficientemente elevata da poter essere trascurata nel modello: per semplicità le coppie motrici sono applicate direttamente come ingressi del sistema;
 - la palla si muove solo su superfici piane orizzontali.
- Come **parametri del sistema** si usino i dati presenti nella Tabella 2.1 in [Fankhauser and Gwerder, 2010].
 - Si determinino i valori degli ingressi (coppie motrici) e delle variabili di stato corrispondenti alle seguenti **3 condizioni di equilibrio** per l'asta del sistema planare di Fig. 2, corrispondenti a:
 - sistema di Fig. 2 in quiete, con asta verticale (stato di equilibrio per il sistema complessivo);
 - sistema planare con asta inclinata di $+5^\circ$ e rispettivamente di -5° rispetto alla verticale (asse z). Si noti che in questi due ultimi casi non si tratta di stati di equilibrio del sistema complessivo, ma di ...
 - Si **linearizzi il sistema** in corrispondenza di ciascuno dei 3 equilibri.
 - Si **discretizzino** le descrizioni in equazioni di stato ottenute per i sistemi linearizzati nelle condizioni assegnate, facendo uso della tecnica di **discretizzazione per invarianza alla risposta allo scalino** ed utilizzando la **frequenza di campionamento** $f_s = 157.8 \text{ Hz}$.
 - Si **simuli** in Matlab il comportamento dei **3 sistemi linearizzati ed a segnali campionati** ottenuti come risposte ai punti precedenti, **analizzando e commentando i risultati ottenuti in condizioni nominali** ed in **condizioni perturbate** (piccole perturbazioni sullo stato).

Riferimenti bibliografici

- ETHZ-Rezero. Project Rezero. ETH Zurich, Autonomous Systems Lab.
URL <http://rezero.ethz.ch/>.
- P. Fankhauser and C. Gwerder. Modeling and Control of a Ballbot. Bachelor's thesis, ETH–Swiss Federal Institute of Technology Zurich, 2010.
URL <https://doi.org/10.3929/ethz-a-010056685>.
- T. B. Lauwers, G. A. Kantor, and R. L. Hollis. A dynamically stable single-wheeled mobile robot with inverse mouse-ball drive. In *Proceedings 2006 IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2006. ICRA 2006.*, pages 2884–2889, May 2006. doi: 10.1109/ROBOT.2006.1642139.
- Masaaki Kumagai and Takaya Ochiai. Development of a robot balancing on a ball. In *2008 International Conference on Control, Automation and Systems*, pages 433–438, Oct 2008. doi: 10.1109/ICCAS.2008.4694680.
- U. Nagarajan, G. Kantor, and R. Hollis. The ballbot: An omnidirectional balancing mobile robot. *The International Journal of Robotics Research*, 33(6):917–930, 2014. doi: 10.1177/0278364913509126. URL <https://doi.org/10.1177/0278364913509126>.
- S. S. Prieto, T. A. Navarro, M. G. Plaza, and O. R. Polo. A Monoball Robot Based on LEGO Mindstorms [Focus on Education]. *IEEE Control Systems Magazine*, 32(2):71–83, April 2012. doi: 10.1109/MCS.2012.2185888.
- G. Seyfarth. Design, Construction, and Evaluation of a Ballbot with a Spherical Induction Motor. Master's thesis, Robotic Institute, Carnegie Mellon School of Computer Science, 2016.