

# Dinamično modeliranje in simulacija fleksibilnega rotacijskega robotskega manipulatorja z enim segmentom, ki deluje v režimu hitrih zaustavitvev

Mihai Dupac\* – Siamak Noroozi

Univerza v Bournemouthu, Znanstveno-tehniška fakulteta, Združeno kraljestvo

Modeliranje in simulacija manipulatorjev z enim segmentom sta v zadnjih letih deležna velike pozornosti, cilj pa je izboljšanje produktivnosti in zmanjšanje proizvodnih stroškov. Dinamika in upravljanje manipulatorjev z enim segmentom zaradi pomena in uporabnosti tega področja (npr. pri vzdrževanju jedrskih naprav in pri aplikacijah v vesolju) štejeta za zanimiv raziskovalni problem, s katerim se ukvarja na tisoče raziskovalcev. Na dinamični odziv manipulatorjev, sestavljenih iz povezanih fleksibilnih in togih delov, vplivajo predvsem deformacije komponent in mehanski udarci, ki povzročajo visoko stopnjo vibracij ter ogrožajo natančnost in varnost delovanja. Zvezne deformacije segmentov, redni udarci zaradi zračnosti in materialne lastnosti, ki niso enake za natezni in za tlačni režim delovanja, povzročajo oblikovanje in rast razpok. Različni materiali se različno odzivajo na udarce, porazdelitev kinetične energije pa je pomembna za ugotavljanje odziva takšnih sistemov. Članek obravnava natančno matematično modeliranje in simulacijo takšnih sistemov za boljše razumevanje in izboljšanje njihovega mehanskega odziva.

Članek obravnava modeliranje in simulacijo iztegljive rotacijske robotske roke s togo ročico in omejenim fleksibilnim segmentom, ki je izpostavljena režimu hitrih zaustavitvev. Gibanje enega konca fleksibilnega segmenta, ki se vrti v vodoravni ravnini s konstantno kotno hitrostjo, je omejeno z vnaprej določeno trajektorijo. Omejena trajektorija omogoča nadzor nad trajektorijo, orodje na koncu robotske roke pa se izogne oviram. Opravljene simulacije na krožni/krožno-eliptični omejeni trajektoriji vključujejo hitro zaustavitvev po dveh kompletnih obratih za določitev vedenja manipulatorja v realnih delovnih pogojih. Vpliv zračnosti na dinamično vedenje sistema, torej na stik/udarec iztegljivega segmenta ob togo ročico ob nenadnih zaustavitvah in vrtenju segmenta, je bil opredeljen s primerjavo modela z upoštevanjo zračnosti in takšnega brez zračnosti.

Model stika/udarcev v sistemu več teles je običajno opisan z zveznimi ali nezveznimi modeli. Zvezni pristop uporablja naslednja razširjena modela: (i) model zvezne kontaktne sile, ki privzema, da je sila pri trku zvezna funkcija deformacije in je lahko linearna (Kelvin-Voigtov model) ali nelinearna (po Hertzovem zakonu), in (ii) model/metodologijo enostranske omejitve, ki privzema tlačne sile v kinematičnih omejitvah enačb gibanja; te sile izginejo, ko se stik ob udarcu teles/segmentov prekine. Model nezvezne kontaktne sile, ki je bil uporabljen za vrednotenje udarcev v tem članku, privzema hipen udarec in ohranitev konfiguracije sistema med trkom. Pri matematičnem pristopu se integracija enačb gibanja konča v trenutku trka, ko se izračuna bilanca navora za določitev hitrosti komponent sistema po trku. Med trkom, ki je običajno razdeljen na fazo kompresije in na fazo ekspanzije, se zanemarijo vse sile v mehanskem sistemu, ki niso povezane s sunkom. Newtonov zakon trka poveže obe fazi tako, da poda razmerje med relativno hitrostjo po trku ter koeficientom trka (ki določa energijske izgube) in relativno hitrostjo pred trkom. Pri modeliranju sunka sile in hitrosti pri trku so bile uporabljene naslednje kinematične predpostavke: i) telesa so toga in se ob trku ne deformirajo; ii) do trka pride med ogliščem in robom; iii) sila udarca in impulz sile delujeta na oglišča; iv) trk je modeliran s pomočjo koeficienta trka; v) položaj teles se od začetka do konca trka ne spreminja; vi) hitrost teles se ne spreminja med trkom; vii) sprememba hitrosti teles ob koncu trka je nezvezna. Vpliv trenja lahko zanemarimo in stik/udarec fleksibilnega segmenta ob ročico je zato brez trenja. Možne vrste udarcev med fleksibilnim segmentom in vodilom so: i) brez udarca, ii) udarec v eni točki in iii) udarec v dveh točkah.

Pri snovanju rotacijskega manipulatorja je pomembno zmanjšanje dinamičnega odklona segmenta med visokohitrostnim gibanjem, zato je bil upoštevan vpliv višje kotne hitrosti in zračnosti v primerjavi z modelom brez zračnosti. Ugotovljeno je bilo, da hitre zaustavitve povečujejo vzbujanje sistema. Opaženo je bilo tudi, da se amplituda vibracij hipno poveča (ob zmanjšanju lastne frekvence fleksibilnega segmenta, ko se poveča dolžina) takoj po nenadni zaustavitvi, in sicer zaradi povečanja dinamičnih sil. Ugotovljeno je bilo tudi to, da nenadne zaustavitve manipulatorja z enim segmentom ojačijo dinamične sile, s čimer je pojasnjeno povečanje amplitude vibracij. Zmanjšanje dolžine fleksibilnega segmenta zaradi gibanja po omejeni krožno-eliptični trajektoriji pa poveča togost segmenta, kot potrjuje študija vedenja fleksibilnega robotskega manipulatorja z rotacijskim prizmatičnim sklepom. Pri vibrirajočem fleksibilnem zglobov brez zračnosti je bil opažen samo prvi način vibracij, medtem ko se pri modelu zračnosti s fleksibilnim segmentom pojavita prvi in drugi način vibracij. Za validacijo in posplošitev simulacij, o katerih poročajo študija, bodo opravljeni dodatni eksperimentalni preizkusi.

**Ključne besede:** robotska roka, manipulator, zračnost, dinamika, analiza udarca, kontaktne sile