

Prototip robotskega sistema za avtomatsko pobiranje stebelne zelenjave

Erik Pleško¹, Sebastjan Šlajpah¹, Marko Munih¹, Matjaž Mihelj¹

¹Univerza v Ljubljani, Fakulteta za elektrotehniko, Tržaška 25, 1000 Ljubljana
E-pošta: ep9060@student.uni-lj.si

Developing a system for harvesting stem vegetables

This paper presents a development of a system for harvesting stem vegetables. We designed and assembled a rotational delta robot for this task. Firstly we present the initial problem and justify the delta mechanism as a suitable solution. We then present an overview of its inverse kinematics and workspace. We then put forward the CAD model, parts list and assembly. We overview Beckhoff's hardware and software. Lastly, we evaluate mechanical operation of the mechanism and propose future work on the problem.

1 Uvod

Vse večja uporaba robotov v kmetijstvu omogoča razvoj novih tehnologij avtomatike, ki bodo olajšale ali celo prihranile mnoga težka dela. S tem se zmanjšujejo stroški in poraba surovin pri kmetijskih opravilih ter čas proizvodnje [1]. Razvoj na tem področju lahko vpliva tudi na onesnaževanje. Precizno kmetovanje je koncept uporabe novih metod produkcije in upravljanja, ki se poslužujejo različnih tehnologij velikih podatkov o lokacijah pridelkov in njihovi količini. Mnoge robotske rešitve so bile predlagane za uporabo v kmetijstvu: pobiranje in žetev [2], nadzor travnikov, avtonomna košnja, obrezovanje, sejanje, škropljenje in pletje, nadzorovanje in pregled prsti [3], sortiranje in pakiranje. Študija se osredotoča na robotsko pobiranje stebelne zelenjave, specifično špargljev.

Šparglje se tipično pobira v času od marca do julija. Začetek rasti je odvisen predvsem od zunanjih temperatur. Rastlino je potrebno pobrati, ko je prave velikosti, saj steblo kmalu oleseni. Od vsake rastline lahko pobereмо največ 16 poganjkov, ostale poganjke pa rastlina potrebuje za regeneracijo in nabiranje energije za čez zimo. Pregledovanje polj in nabiranje poteka dnevno. Obdobje takšne rasti pa traja do 8 tednov [4].

Primer rasti špargljev je na sliki 1. Rastline se glede na smer vožnje robota lahko pojavljajo vzporedno ali pa zelo blizu skupaj. Rastejo lahko postrani, polja pa so lahko poraščena s plevelom ali travo.

Leu in drugi v [2] predstavljajo prototipno napravo za pobiranje špargljev. Za zaznavo uporabljajo barvno globinsko kamero. Na mobilni platformi pa sta nameščeni



Slika 1: Primer tipične rasti rastlin. Rastline rasejo vzporedno ter blizu skupaj, vir slike [4].

dve robotski roki za pobiranje pridelka. Japonsko podjetje Inaho ponuja rešitev v obliki relativno majhne mobilne platforme z robotsko roko za avtonomno nabiranje zelenjave [5].

2 Metodologija

Za pobiranje špargljev smo predvideli robotsko roko v konfiguraciji rotacijskega delta robota, ki je z dvema dodatnima prostostnima stopnjama zmožna hitrega in natančnega pobiranja špargljev iz različnih smeri.

2.1 Delta robot

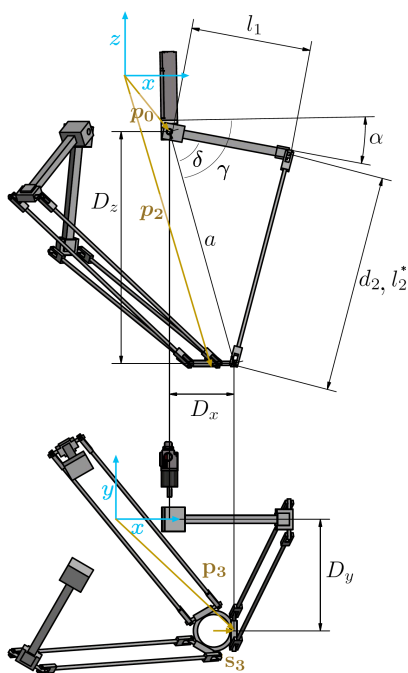
Zasnovali smo robotski mehanizem, ki je sposoben selektivnega nabiranja. Rastline mora pobirati s poljubne smeri po celotnem delovnem območju. Da ohranimo možnost pobiranja med vožnjo, potrebujemo 4 prostostne stopnje vrha robota - 3 pozicije ter orientacijo okoli navpične osi. Mehanizem mora biti sposoben hitre manipulacije rastlin na relativno kratki razdalji. Pobrano lahko odlaga na bližnji tekoči trak, ki pridelek prenaša v glavni zabojnik na premični platformi. Glede na podane zahteve, smo se odločili za 3R delta robota z dodatno rotacijsko prostostno stopnjo na vrhu. Peta prostostna stopnja je odpiranje ter zapiranje prijemale z rezilom.

2.2 Inverzna kinematika in delovni prostor

Prednost paralelnih mehanizmov je enostaven izračun inverzne kinematike. Ker gre za paralelni mehanizem lahko obravnavamo vsako roko ločeno. Zaradi rotacijske simetrije je dovolj izračunati splošno rešitev za eno roko. Rešitev za ostali roki pa dobimo s primernim rotiranjem vhodnih podatkov okoli osi z.

2.2.1 Rešitev za eno roko

Prvi segment se nahaja v ravnini x-z. Označimo dolžini segmentov z l_1 in l_2 . Z vektorjem $\mathbf{p}_i$ označimo konec i -tega segmenta. Štetje začnemo z $i = 0$, kar ustreza koncu baze in hkrati prvemu sklepu. Omenjene veličine so označene na sliki 2.



Slika 2: Stranski ris (zgoraj) ter tloris (spodaj). Osi baznega koordinatnega sistema so označene z modro barvo. Tri dimenzionalni vektorji so označeni z blede rumeno barvo. Skalarne količine so označene s črno barvo. *Dimenzija d_2 je projekcija dimenzije l_2 v ravnino x-z.

Vektor $\mathbf{p}_0$ poznamo iz geometrije baze. Vektor $\mathbf{p}_3$ predstavlja konec platforme oziroma vrh robota. Vektor $\mathbf{p}_2$ ustreza koncu drugega segmenta. Zapišemo lahko

$$\mathbf{p}_2 = \mathbf{p}_3 + \mathbf{s}_3. \quad (1)$$

Vektor $\mathbf{s}_3$ predstavlja premik od vrha robota do konca drugega sklepa, ki ga določimo iz konstrukcije robota.

Izpeljemo sledeče geometrijske relacije (pri tem je $\mathbf{D} = [D_x, D_y, D_z]^T$):

$$\mathbf{D} = \mathbf{p}_2 - \mathbf{p}_0 \quad (2)$$

$$d_2 = \sqrt{l_2^2 - D_y^2} \quad (3)$$

$$a = \sqrt{l_2^2 - D_y^2} \quad (4)$$

$$\cos \delta = \frac{d_1^2 + a^2 - d_2^2}{2d_1 a} \quad (5)$$

V primeru, da vsaj eden izmed izrazov (3) in (4) nima realne vrednosti, rešitev ne obstaja. Če je vrednost izraza (5) po absolutni vrednosti večja od 1, rešitev prav tako ne obstaja.

Z izračunom nadaljujemo:

$$\gamma = \arctan\left(\frac{-D_z}{D_x}\right) \quad (6)$$

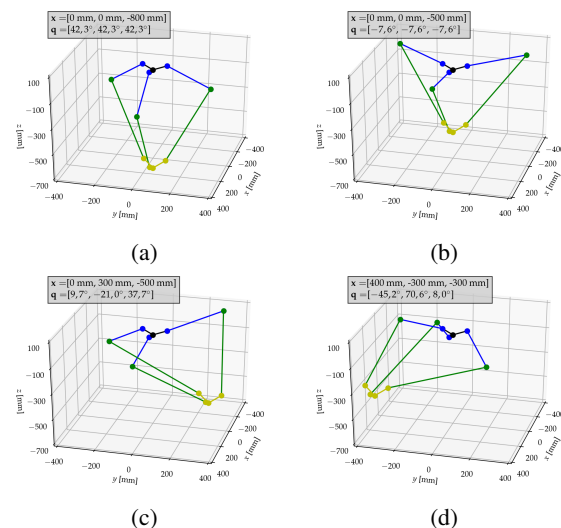
$$\alpha = \gamma - \delta \quad (7)$$

V izrazu (6) pri izračunu uporabimo funkcijo za predznačeni tangens. Izraz (7) je končni rezultat inverzne kinematike, α je kot v prvem sklepu. Pri tem vrednost 0 predstavlja segment, ki je poravnal z osjo x, pozitivne vrednosti kota pa dobimo ob premiku segmenta navzdol.

2.2.2 Celotna rešitev

Rešitev za preostali roki dobimo z rotiranjem zelene lege vrha okoli osi z. Kot rotacije za vsako naslednjo roko povečamo za $-120^\circ = -\frac{2\pi}{3}$ in ponovimo izračun iz poglavja 2.2.1

Na sliki 3 je prikaz vizualizacije inverzne kinematike.



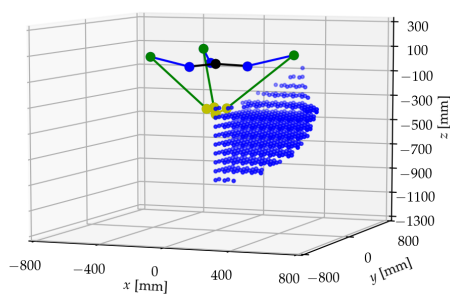
Slika 3: Nekaj primerov rešitev inverzne kinematike za različne lege.

2.2.3 Delovni prostor

Pomemben del teoretične analize je tudi velikost in oblika delovnega prostora. Na sliki 4 je prikazana četrtina delovnega prostora robota, le-ta ima skledasto obliko, ki je tipična za delta robote z rotacijskimi sklepi. Velikost ustreza zahtevam projekta: delovno območje širine enega metra ter višine pol metra.

2.3 Mehanska zasnova robota

Na sliki 5 je prikazan CAD model ene roke robota. Roko poganja motor Beckhoff AM8113 z reduktorjem WPLE040 s prestavnim razmerjem 10. Proizvajalec za navor motorja v mirovanju navaja 0.52 Nm. Rumeno sta obarvana kosa reskana iz aluminija. Sivo so obarvani aluminijasti profili. Oranžno so obarvani Igusovi kroglični sklepi tipa



Slika 4: Delovni prostor robota. Prikazan je ves delovni prostor, ki ga dopušča geometrija sklepov takšnega mehanizma. Praktične omejitve kotov v sklepih niso upoštevane – to sta hod sklepov in trk segmentov mehanizma.

GELMKE-8. Modro sta obarvani Iguosovi osi AWMP-8. Belo so obarvani 3D natisnjeni deli.



Slika 5: CAD model ene roke robota.

Na sliki 6 je prikazan izdelan robotski sistem. Za zaznavo rastlin smo sistemu dodali laserski skener SICK NanoScan3.

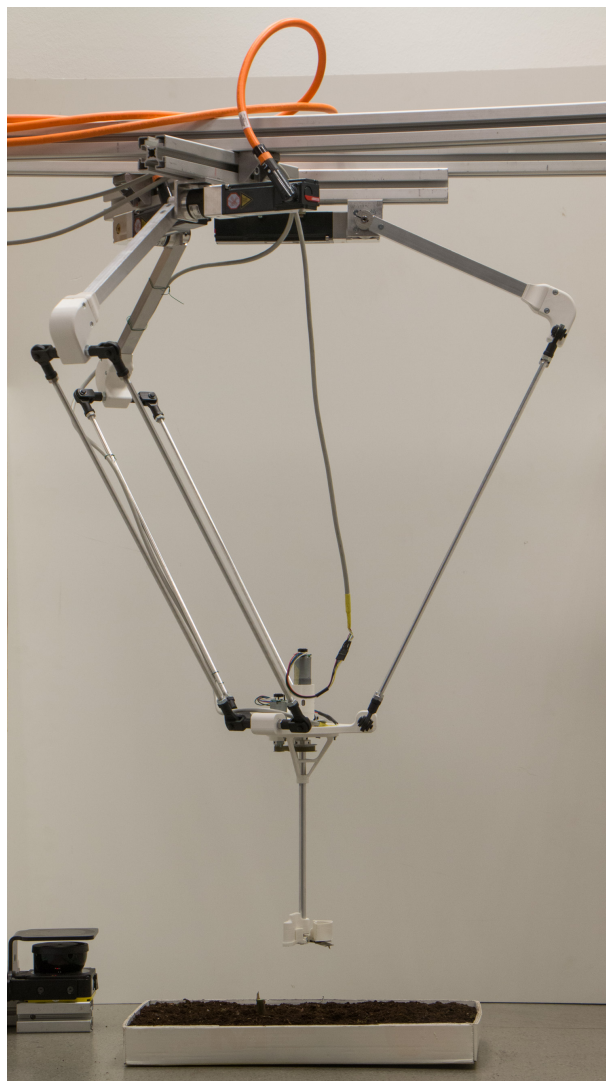
Prijemalo za rezanje in prijemanje špargljev je prikazano na sliki 7. Cev, ki nosi prijemalo, se vrti okoli navpične osi. V njej je še os, ki je povezana s premičnim delom prijemala - to sta rezilo in gumijasti prst za prijemanje. Prostostni stopnji sta vodeni z DC motorjema na platformi mehanizma. Plastične dele bele barve smo 3D natisnili s tiskalnikom Prusa i3 Mk2s, material PLA.

2.4 Programska oprema

Vodenje sistema smo izvedli v dveh nivojih, ki sta komunicirala preko UDP povezave.

2.4.1 PLK Beckhoff

Za razvoj programske opreme na programirljivem logičnem krmilniku (v nadaljevanju PLK) smo uporabili Beckhoff TwinCAT 3. V konfiguracijo so dodani trije servo



Slika 6: Fotografija sestavljenega mehanizma. Pod mehanizmom je pladenj z zemljo. V kotu levo spodaj je laserski skener SICK NanoScan3, uporabljen za zaznavo rastlin.



Slika 7: Fotografiji odprtega ter zaprtega prijemala ob pobiranju šparglja. Med prijemanjem rezilo špargelj odreže. Mehki del prijemala (3D natisnjen z materialom TPU) primerno stisne špargelj ne glede na njegovo debelino.

motorji ter dva DC motorja. Nastavljeni so parametri dinamike, začetne lege motorjev, ter programske končne omejitve sklepov. Krmilnik izvaja hitrostno vodenje motorjev ter komunicira z ROS vozlišči preko UDP povezave.

2.4.2 ROS

Višji nivo smo naredili v programskem paketu ROS z vozlišči napisanimi v jeziku Python. Na tem nivoju je potekala zaznava špargljev, načrtovanje premikanja, interpolacija ter vodenje robota.

Za preprosto zaznavo špargljev smo uporabili laserški skener SICK NanoScan3. Od izmerjenih točk uporabimo le točke, ki ležijo v bližnji okolici pobiralne površine. Dovolj točk, ki so si paroma bližje od tipičnega premera šparglja, ustreza šparglju. Njihovo povprečje določa središče šparglja.

Iz zaznanih središč špargljev program ustvari vmesne točke. Za vsako rastlino določimo smer približevanja ob pobiranju. Med točkami se vrh robota premika premo. Uporabili smo interpolacijo minimalnega odvoda pospeška (ang. minimum jerk interpolation).

Robota vodimo zaprtizančno v notranjih koordinatah. Iz zelene pozicije robota v zunanjih kartezičnih koordinatah z inverzno kinematiko izračunamo zelene notranje koordinate. Razlika med zelenimi ter dejanskimi koordinatami sklepov je vhod v proporcionalno diferencialni regulator katerega izhod so zelene hitrosti sklepov robota. Te se pošljejo na PLK.

3 Testna aplikacija pobiranja

Na sliki 8 je prikazana sekvenca pobiranja ene rastline. Delovanje smo preizkusili po celotnem delovnem območju robota ter na špargljih debeline od 5 mm do 15 mm. Preizkusili smo pobiranje rastlin dolgih od 5 cm do 30 cm. Najprej smo preizkusili pobiranje ene rastline na enkrat. Sistem je rastlino vedno zaznal in jo uspešno pobral.

Preizkušali smo tudi postavitev z več rastlinami. Dokler se v vidnem polju laserskega skenerja rastline ne prekrivajo, zaznava poteka nemoteno. Šum in občasne artefakte na robovih rastlin povprečenje uspešno izloči.

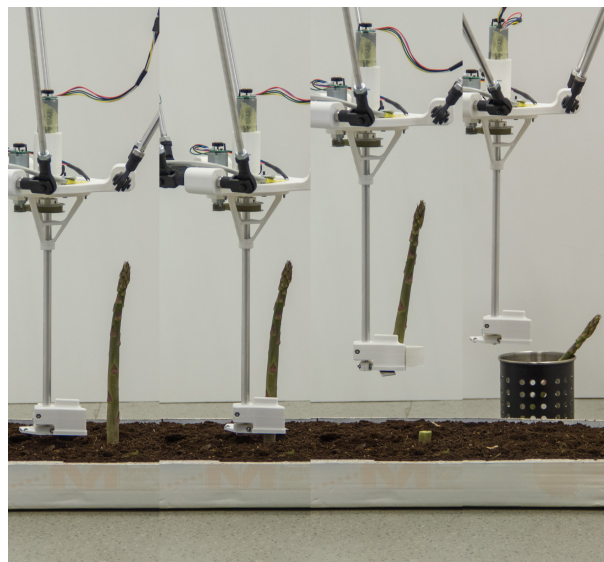
Ob ustrezni zaznavi je bilo pobiranje rastlin popolnoma uspešno dokler si sosednji rastlini nista bili bližje od 5 cm. Uspešno pa je sistemu uspelo pobrati večino rastlin do medsebojne razdalje 3 cm. Dodaten pogoj za uspešno pobiranje je vsaj 10 cm prostora brez rastlin iz smeri pobiranja.

Posnetek delovanja je dostopen na [6].

4 Diskusija

V delu smo predstavili robotski mehanizem delta konfiguracije za pobiranje stebelne zelenjave. Robota smo opremili z dvema dodatnima prostostnima stopnjama, ki omogočata različne smeri pristopa k rezanju.

Naslednji korak v razvoju sistema je integracija mehanizma z mobilno platformo. Ob tem pa je potrebno razviti še robusten sistem za zaznavo in prepoznavo rastlin na polju.



Slika 8: Fotografija pobiranja šparglja.

Predstavljena zasnova mehanizma se je izkazala za ustrezno, integracija z mobilno platformo pa bo predstavljala resničen potencial za avtomatsko in avtonomno pobiranje ne samo špargljev, ampak celotnega spektra stebelne zelenjave.

Literatura

- [1] Moysiadis V, Tsolakis N, Katikaridis D, Sørensen CG, Pearson S, Bochtis D. Mobile Robotics in Agricultural Operations: A Narrative Review on Planning Aspects. *Applied Sciences*. 2020; 10(10):3453. <https://doi.org/10.3390/app10103453>
- [2] Leu A, Razavi M, Langstädtler L, Ristić-Durrant D, Raffel H, Schenck C, Gräser A, Kuhfuss B. Robotic Green Asparagus Selective Harvesting. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2017;22(6): 2401-2410, doi: 10.1109/TMECH.2017.2735861.
- [3] Łukowska A, Tomaszuk P, Dzierżek K, Magnuszewski Ł. Soil sampling mobile platform for Agriculture 4.0, 2019 20th International Carpathian Control Conference (ICCC), Krakow-Wieliczka, Poland, 2019:1-4, doi: 10.1109/CarpathianCC.2019.8765937.
- [4] Boeckmann C, "Growing asparagus," *The old Farmer's Almanac.*, 8-Apr-2010. [Online]. Available: <https://www.almanac.com/plant/asparagus>. [Accessed: 16-Feb-2021].
- [5] Hishiki Y, Ohshima S, Tobayama S, and Shimizu T, "To make farming more sustainable," Inaho Inc., 22-Okt-2020. [Online]. Available: <https://en.inaho.co/>. [Accessed: 25-Jul-2021].
- [6] Pleško E, "Robotski sistem za pobiranje stebelne zelenjave", 27-Jul-2021. [Online]. Available: <https://shorturl.at/en0Z>. [Accessed: 27-Jul-2021].