

Wiktor NOWACKI*, Grzegorz WICZYŃSKI*

STEROWANIE PLOTERA W KARTEZJAŃSKIM UKŁADZIE XY

W artykule przedstawiono zagadnienie sterowania końcówką roboczą dwuosiowego manipulatora w standardowym układzie kartezjańskim. Omówiono możliwość wykonania ruchu point-to-point oraz interpolacji pewnych geometrii tak, aby możliwy był ruch robota wzdłuż określonej trajektorii. Równania matematyczne zaimplementowano na sterowniku z mikrokontrolerem STM32 i przeprowadzono testy na fizycznym urządzeniu, dla którego omówiono konstrukcję mechaniczną oraz istotne aspekty elektroniczne, szczególnie te dotyczące sterowania silnikami i obsługi enkoderów kwadraturowych.

SŁOWA KLUCZOWE: układ kartezjański, ploter, trajektoria, interpolacja, manipulator.

1. WPROWADZENIE

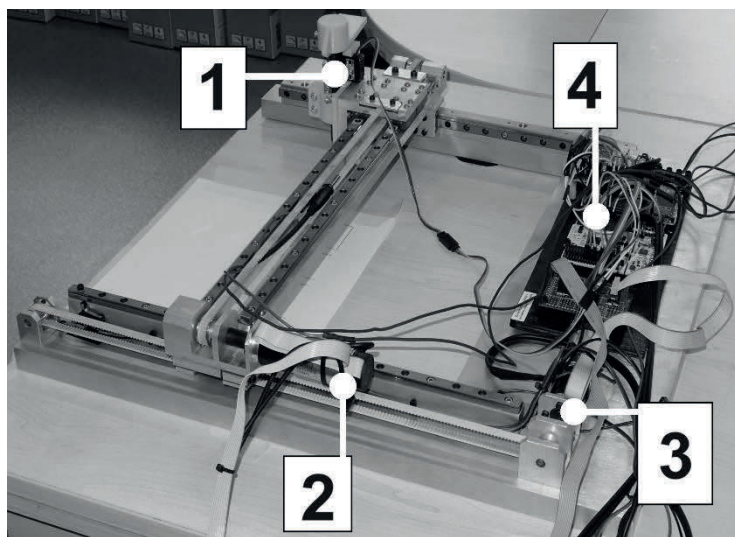
Dynamiczny rozwój automatyki, obserwowany na przestrzeni ostatnich lat, pozwolił na równoległy rozwój wiedzy związanej ze stosowalnością teorii sterowania i dziedzin pokrewnych [1]. Pociąga to za sobą możliwość tworzenia projektów związanych z szeroko rozumianą robotyką oraz wykorzystywanie ich w coraz bardziej różnorodnym spektrum aplikacji, które dotyczyć mogą również innych obszarów nauki. Jednym ze sztandarowych zadań, które próbowano zautomatyzować i nadal trwa doskonalenie tego procesu [2], jest wykonanie ruchu pewnego obiektu wzdłuż określonej ścieżki. Mowa tutaj [3] zarówno o robotach mobilnych, które same w sobie stanowią integralny obiekt przemieszczający się, jak i robotach stacjonarnych mających za zadanie wykonać ruch efektem. To, czym będzie końcówka robocza, leży w gestii projektantów konkretnej aplikacji, niemniej spotkać można coraz śmielsze i ciekawsze wykorzystanie potencjału różnego typu robotów – np. w projekcie [4] efektor pozwalał mierzyć najważniejsze sygnały biomedyczne, [5] to przykład robota automatyzującego badania laboratoryjne, a [6] stanowił projekt z efektem przycinającym gałęzie drzew owocowych. Wskazane jest zatem prowadzenie testów również nad samymi manipulatorami tak, aby w przyszłości móc je wykorzystać jako bazę do dalszych doświadczeń lub w celach dydaktycznych. Jedną z najczęściej spotykanych struktur kinetycznych jest układ kartezjański. Ortogonalność osi i fakt, że poszczególne stopnie swobody tej konstrukcji są względem siebie niezależne

* Politechnika Poznańska

istotnie upraszcza zadanie sterowania. Zaletą ta obarczona jest wadą w postaci dostępności jedynie dwóch stopni swobody (dla układu z rysunku 1) oraz polem roboczym mniejszym od wymiarów samego robota, co nie jest jednak przeszkodą w wybranych aplikacjach zrobotyzowanych.

2. OPIS KONSTRUKCJI MECHANICZNEJ

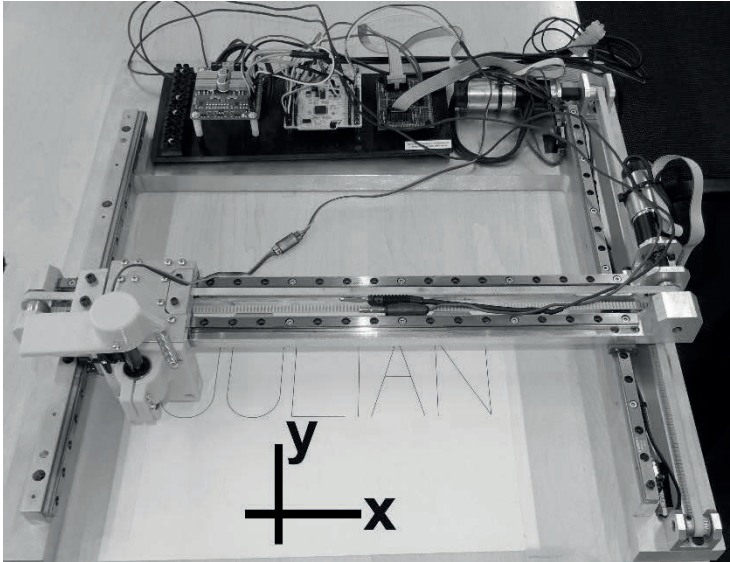
Jako bazę części mechanicznej projektu obrano ploter zbudowany do prac badawczych w Zakładzie Metrologii, Elektroniki i Techniki Światłowej Politechniki Poznańskiej. Jest to tak zwany „układ bramowy”, w którym oś X umieszczono na wózkach osi Y. Bazę wyfrezowano numerycznie z płyty aluminiowej. Użyto przewodnic liniowych Hiwin typu HGR. Napęd stanowią dwa silniki szczotkowe prądu stałego Maxon wraz z przekładniami planetarnymi, które to wprawiają w ruch koła zębate, a te za pomocą pasków zębatych poruszają wózki liniowe Hiwin. Najistotniejsze podzespoły konstrukcji mechanicznej wyróżnia rys. 1, zaś umowne oznaczenie osi X/Y przedstawia rys. 2.



Rys. 1. Omawiany ploter; 1 – efektor; 2 – napęd osi X, 3 – napęd osi Y, 4 – układ sterujący

Istotną wadą, którą zaobserwowano podczas eksploatacji robota, jest asymetria napędu bramy, co prowadzi do tak zwanego zjawiska „przekoszenia”, a które wprost wynika z powstania dźwigni jednostronnej dla siły pochodzącej od silnika, sił tarcia oraz luzów na prowadnicach. Zjawisko podczas testów nie było uciążliwe, należałoby jednak bezwzględnie mu zapobiec przy skalowaniu konstrukcji lub sytuacji, kiedy siły działające na efektor byłyby porównywalne z tymi, które wynikają z momentów obrotowych generowanych przez napędy.

Istnieje kilka możliwości rozwiązania tego problemu, elektromechanicznie - należałoby dodać symetrycznie bliźniaczy silnik dla nienapędzanej aktualnie strony bramy (komplikuje to jednak układ sterowania przez konieczność synchronizacji takiej pary, co szczegółowo opisano w [7]) lub wprost mechanicznie – przez dodanie wału przenoszącego obrót na każdą ze stron bramy [8].

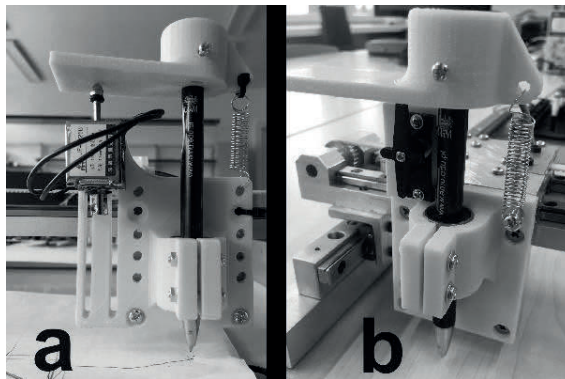


Rys. 2. Zdjęcie konstrukcji wraz z wyróżnieniem osi X oraz Y

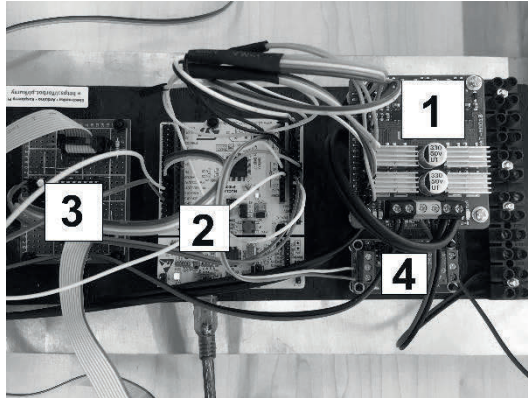
3. STEROWANIE NAPĘDAMI PLOTERA

Do fizycznej implementacji rozwiązania sprzętowego, zdecydowano użyć się mikrokontrolera STM32, przede wszystkim ze względu na liczne układy peryferyjne, w tym układy licznikowe ze sprzętowym wsparciem enkoderów kwadraturowych [9]. Z uwagi na konieczność kondycjonowania sygnałów pochodzących z enkoderów dodano autorską płytkę z wykorzystaniem układu AM26LS32PC. Ze względu na parametry użytych silników zdecydowano o podłączeniu ich do mostków H w postaci dedykowanej platformy Cytron HAT-MDD10 [10]. Źródło zasilania stanowił zasilacz laboratoryjny o napięciu stałym 12 V i maksymalnej wydajności prądowej 10 A. Ostatnim elementem elektromechanicznym omawianego układu był przekaźnik, który w zamyśle miał sterować siłownikiem elektromagnetycznym jako efektem fizycznego manipulatora. Dodać należy w tym miejscu, że pomysł okazał się niepraktyczny – siłownik elektromagnetyczny zaprezentowany na rys. 3a nie nadaje się do pracy w trybie ciągłym – nieprzerwane dostarczanie zmanionego napięcia doprowadziło

do wzrostu jego temperatury tak dalece, iż uzwojenie uległo przepaleniu, a drukowany 3D uchwyt z tworzywa ABS stracił pierwotną geometrię. Rozwiązaniem było takie przeprojektowanie mechaniki, aby wykorzystywać tylko impulsowy ruch siłownika (na zasadzie analogicznej, jak ma to miejsce dla elektroczepów) lub zmienić efektor. Zdecydowano się na użycie serwomechanizmu modelarskiego SG-90 (rys. 3b). Dodać należy, że oś Y zabezpieczona jest wyłącznikami krańcowymi, które chroniły manipulator przed wyjazdem poza bezpieczny zakres ruchów podczas testów. Warte uwagi są również spostrzeżenia płynące z obserwacji zależności kształtu prądu płynącego przez uzwojenie silnika w funkcji częstotliwości sygnału PWM sterującego mostkiem H. Dla przykładu, częstotliwość sygnału PWM równa 1 kHz powodowała drgania bramy, hałas oraz wydzielanie się dużych ilości ciepła. Zwiększenie tej wartości do 20 kHz (co stanowi górną barierę związaną z możliwościami samych końcówek mocy sterownika Cytron) istotnie poprawiło płynność ruchów oraz zmniejszyło temperaturę pracy silników. Zdjęcie fizycznego układu sterowania przedstawia rys. 4.



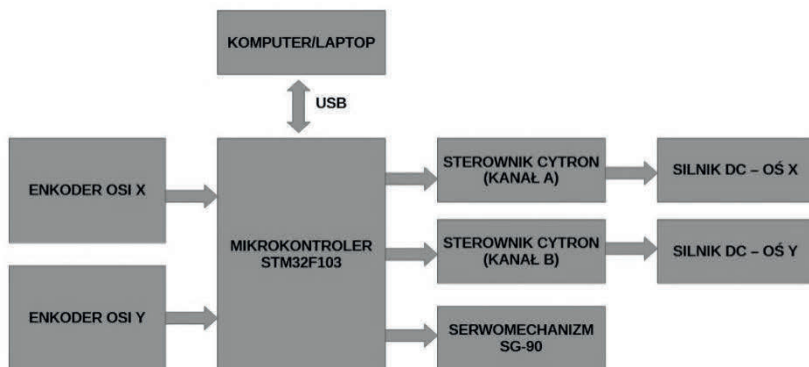
Rys. 3. Efekторы: a) wersja z elektromagnesem, b) wersja poprawiona, z serwomechanizmem



Rys. 4. Układ sterowania; 1 – mostek H, 2 – moduł Nucleo, 3 – płytki obsługujące enkodery, 4 – moduł przekaźnika

4. BLOKI ELEKTRONICZNE PLOTERA

Każdy układ regulacji automatycznej, a takim bez wątpienia jest układ sterujący przedstawionym ploterem, wymaga toru sprzężenia zwrotnego, tutaj – czujników pozwalających określić przemieszczenie wózka tak w osi X, jak i w Y. W tym celu wykorzystano wbudowane w zespoły napędowe firmy Maxon [11] enkodery magnetyczne [12]. Warto zauważyć, że wystawiają one sygnał symetryczny, który – dzięki układowi kondycjonującemu – jest odporny na zakłócenia elektromagnetyczne pojawiające się w naturalny sposób wokół przewodów wysokoprądowych, a te muszą biec równoległe wzdłuż toru pomiarowego. Dodać należy, iż początkowo planowano wykorzystać tylko jeden z dostępnych kanałów, bez wykorzystania układu pośredniczącego AM26LS32PC. Wskutek wspomnianych interferencji elektromagnetycznych zauważono, że kilkakrotny cykl roboczy (załączenie i wyłączenie silnika) natychmiast prowadzi do przekłamań fizycznego położenia wału silnika względem wartości zmierzonych. W projekcie użyto mikrokontrolera, który posiada wbudowane cztery liczniki sprzętowe. Dwa z nich użyto celem obsługi enkoderów każdej z osi, jeden to generator sygnałów PWM niosący sygnał o zadanej prędkości obrotowej silnika, a czwarty to generator sygnału PWM dla serwomechanizmu modelarskiego. Układ działa w logice 3,3 V, dodać należy, że niektóre z pinów producent opisuje jako „5 V tolerant”, co pozwoliło chociażby na bezpośrednie podłączenie układu AM26LS32PC działającego przy napięciu zasilania 5 V. Realizację układu sterującego ploterem w sposób blokowy przedstawia rys. 5.



Rys. 5. Schemat blokowy układu sterującego ploterem

5. ALGORYTM STEROWANIA TRAJEKTORIĄ KOŃCÓWKI ROBOCZEJ

Prace rozpoczęto od wyznaczenia zależności (1) orazysterowania pojedynczej osi. Zaimplementowano klasyczny regulator PD, w którym wartością zadaną była wartość kąta obrotu wału wyrażona w impulsach enkodera, sprzężeniem zwrotnym – ich ilość wskazywana w danej chwili przez licznik układu STM, a samym sygnałem sterującym był sygnał prostokątny o zmiennym współczynniku wypełnienia, który sterował mostkiem H, a ten prędkością obrotową napędu. Należy tutaj dodać o pewnej niedogodności związanej w nieliniowością fizycznego układu i tak zwaną „strefą nieczułości” – przy bardzo małym uchybie, rzędu kilkudziesięciu impulsów z enkodera, współczynnik wypełnienia PWM był na tyle niewielki, że wał przez opory tarcia nie poruszał się. Problem ten potencjalnie mogłyby być rozwiązany przez dodanie członu całkującego I, zdecydowano jednak o rozwiązaniu prostszym – kiedy uchyb jest minimalny (nie ma to wpływu na precyzję ruchów – przykładowe 100 impulsów tolerancji w osi Y odpowiada dystansowi ok. 0,1 mm, co jest wartością pomijalną względem luzów układu mechanicznego), ruch jest uznany za zakończony. Bez tej modyfikacji program oczekiwał na sprowadzenie uchybu do zera, co z kolei prowadziło do blokowania programu. Określenie zadanej zmiany licznika enkodera określa zależność (1).

$$n = \frac{s}{v} \cdot p \cdot r \quad (1)$$

gdzie:

n – liczba impulsów, o które powinien zmienić się licznik enkodera [imp],

s – zadany dystans [mm],

v – współczynnik określający, jaki przesuw liniowy spowoduje jeden pełen obrót koła zębatego [mm/obr],

p – przełożenie przekładni [-],

r – współczynnik określający, ile impulsów z enkodera przypada na jeden pełen obrót wału silnika [imp/obr].

Zauważyć należy, że we wzorze (1) zmienną niezależną jest „ s ”, zaś pozostałe współczynniki można uprościć do proporcjonalności zgodnej z (2). Przeprowadzono doświadczalne porównanie współczynnika „ a ” uzyskanego teoretycznie oraz wynikającego z testów praktycznych (przesuwano karetkę o pewien dystans i obserwowano wskazanie licznika enkodera – do tego typu testów ręcznych przydatne okazał się wbudowany w mikrokontroler układ do debugowania oraz środowisko STMStudio, które pozwala obserwować zmienne programu bez wpływu na port szeregowy). Uzyskano zgodność przewidywań z wynikami doświadczenia.

Przeliczanie dystansu wyrażonego w impulsach enkodera na milimetry i odwrotnie możliwe jest na podstawie uproszczonego wzoru (2)

$$n = a \cdot s \quad (2)$$

gdzie

$$a = \frac{p \cdot r}{v} \quad (3)$$

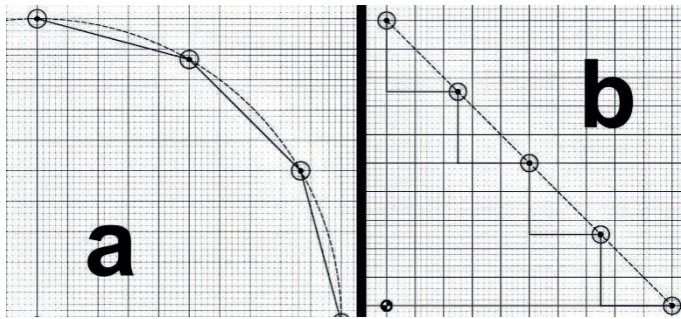
Po uzyskaniu satysfakcjonujących efektów dla każdego z napędów dodano możliwość sterowania pozycją wyrażoną w milimetrach. Umożliwiło to kreślenie odcinków równoległych do wybranego kierunku. Następnie obie funkcje połączono, co pozwoliło na niezależne sterowanie pozycją karetki w każdej z osi. Ostatnim krokiem było zaimplementowanie możliwości wykreślenia odcinki nierównoległych do osi X lub Y, okręgów oraz łuków. Istotą aproksymacji wyjaśnia rys. 6. Odcinki nierównoległe przybliżane są pojedynczymi ruchami każdego z silników – ze względu na znaczną różnicę obciążeń wartości przełożeń różnią się od siebie – silnik osi Y musi bowiem poruszyć bramę, zaś silnik osi X – wyłącznie karetkę. Powoduje to, że maksymalna prędkość osiągnięta w osi X jest istotnie większa od maksymalnej prędkości osi Y, a to z kolei wymusza konieczność „sztucznego” zwolnienia tego pierwszego przez podzielenie zadanego odcinka na wiele pojedynczych etapów trajektorii. Dla użytkownika końcowego efektor porusza się jednak w sposób płynny. Okrąg przybliżany jest (4) – z określoną dokładnością dyskretyzuje się zmienną niezależną t , otrzymując zbiór punktów opisanych współrzędnymi X oraz Y. Definicja łuku zakłada określenie wybranego podzbioru ze zbioru punktów reprezentujących wielobok wpisany w okrąg. Realizacja programu zakłada również osiąganie kolejnych wartości zadanych przy równoczesnym sterowaniu serwomechanizmem – dla wybra-

nych punktów przypisano możliwość zmiany sygnału sterującego serwomechanizmem, co pozwala podnieść/opuścić długopis będący efekтором dla aplikacji testowej. Do dyskretyzacji trajektorii odtwarzającej okręgi i łuki zastosowano (4).

$$x(t) = r \cdot \cos(t) \quad \text{oraz} \quad y(t) = r \cdot \sin(t) \quad (4)$$

gdzie

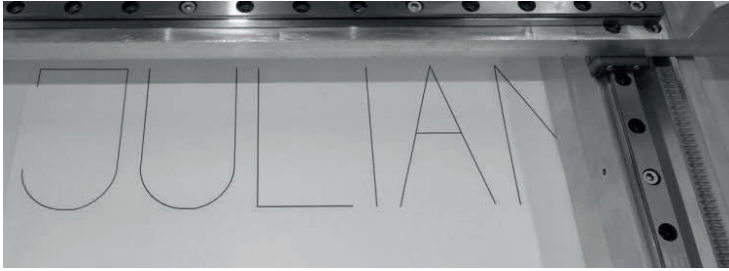
$$t \in [0; 2\pi] \quad (5)$$



Rys. 6. Idea aproksymacji: a) łuku; b) odcinka nierównoległego do osi X lub Y

6. TEST PLOTERA

Jako zadanie testowe zdefiniowano wykonanie napisu na kartce papieru. Przykładowy efekt końcowy przedstawia rys. 7. Każda z liter zdefiniowana jest jako zestaw pewnych odcinków i łuków, ponadto w programie zdefiniowano zachowanie końcówki rysującej. Uzyskany rezultat prac spełnił wszystkie założenia początkowe oraz jest na tyle satysfakcjonujący, aby możliwe było wykorzystanie manipulatora w dalszych pracach badawczych, które obejmować mogą sterowanie prędkością i przyspieszeniem efektora lub jego wymianą na nietypowe końcówki robocze. Dodać należy, że wizualnie oceniono powtarzalność ruchów roboczych, wielokrotnie uruchamiając ten sam program – każdorazowo linie pokrywały się, co pozwala stwierdzić powtarzalność na poziomie mniejszym niż szerokość linii długopisu, czyli ok. 0,5 mm.



Rys. 7. Efekt końcowy – widok przykładowego napisu wykreślonego przez ploter

7. PODSUMOWANIE

Przedstawiony ploter, mimo standardowego układu kinematycznego, stanowi pod kątem mechanicznym konstrukcję nietypową, będącą jednostkowym prototypem należącym do Zakładu Metrologii, Elektroniki i Techniki Świetlnej Politechniki Poznańskiej. Istotnym zauważeniem jest fakt dużej sztywności konstrukcji poprzez wyfrezowanie jej ramy oraz elementów nośnych z płyty aluminiowej. Z powodzeniem do już istniejącej warstwy elektromechanicznej urządzenia dodano autorskie warstwy elektroniki i oprogramowania sterującego, które pozwalają przemieścić końcówkę roboczą w dowolny punkt w przestrzeni roboczej plotera, zadając przy tym trajektorię składającą z podstawowych geometrii - odcinków oraz łuków.

Film ilustrujący pracę manipulatora dostępny jest pod adresem: <https://youtu.be/IzhfrDBkqoI>

LITERATURA

- [1] Bilski P., Teoria sterowania – podstawy, <https://www.elektro.info.pl/artukul/automatyka/1489,teoria-sterowania-podstawy> – dostęp 01.09.2023.
- [2] Creating Better Collision-Free Trajectory for Robot Motion Planning by Linearly Constrained Quadratic Programming, <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fnbot.2021.724116/full> – dostęp 02.09.2023.
- [3] Rodzaje robotów przemysłowych i ich zastosowanie, <https://www.ebmia.pl/wiedza/porady/automatyka-porady/rodzaje-robotow-przemyslowych/> – dostęp 02.09.2023.
- [4] Sensing Robots Developed to Monitor Patients, <https://www.medicaldesignbriefs.com/component/content/article/mdb/insiders/mr/stories/38807> – dostęp 04.09.2023.
- [5] Sample treatment platform for automated integration of microextraction techniques and liquid chromatography analysis, https://www.researchgate.net/publication/331188215_Sample_treatment_platform_for_automated_integration_of_microextraction_techniques_and_liquid_chromatography_analysis – dostęp 04.09.2023.

- [6] Robotic Pruner Ready to Cut Down Production Problems in Apple Orchards, <https://www.globalagtechinitiative.com/market-watch/robotic-pruner-ready-to-cut-down-production-problems-in-apple-orchards/> – dostęp 04.09.2023.
- [7] Z. Liu, W. Lin, X. Yu, J. J. Rodríguez-Andina and H. Gao, Approximation-Free Robust Synchronization Control for Dual-Linear-Motors-Driven Systems With Uncertainties and Disturbances, in *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 69, no. 10, pp. 10500-10509, Oct. 2022, doi: 10.1109/TIE.2021.3137619.
- [8] XY Gantries & Cartesian Robots by drylin®, <https://www.igus.com/info/xy-gantry> – dostęp 09.09.2023.
- [9] Nota katalogowa układów serii STM32F103x8, <https://www.st.com/resource/en/datasheet/stm32f103c8.pdf> – dostęp 09.09.2023.
- [10] Nota katalogowa HAT-MDD10 10Amp DC Motor Driver for Raspberry Pi, <https://docs.google.com/document/d/19JLDnzU0y-9FKH4ZXm0lk4xtMJKtaKTDBT5ulGgj8UI/view> – dostęp 09.09.2023.
- [11] Wyciąg z katalogu silników szczotkowych firmy Maxon, https://www.maxongroup.com/medias/sys_master/root/8821063221278/16-228-EN.pdf – dostęp 09.09.2023.
- [12] Wyciąg z katalogu enkoderów dedykowanych silnikom Maxon https://www.maxongroup.com/medias/sys_master/root/8883965493278/EN-21-478.pdf – dostęp 09.09.2023.

PLOTTER CONTROL IN THE CARTESIAN XY COORDINATES

This paper shows basic method of control end-effector for a two-axis manipulator in a standard Cartesian system. The possibility of performing point-to-point motion and interpolating geometric data for possibility of performing electrical motion for specific trajectories was discussed. Mathematical equations implemented on controllers with an STM32 microcontroller and tested on a physical controller. Mechanical details were presented, and important electronic aspects were discussed, especially those regarding motor control and operation of quadrature encoders.

KEYWORDS: cartesian coordinates, plotter, trajectory, interpolation, manipulator.

(Received: 04.11.2023, revised: 20.11.2023)