

TECHNOLOGICZNE I TECHNICZNE PROBLEMY ROBOTYZACJI UKOSOWANIA BLACH.¹⁾

Streszczenie: W artykule opisano system manipulacyjny z robotem URP-6 na torze jezdynym. Został on zastosowany do ukosowania blach w fabryce maszyn górniczych. Przy budowie generatora trajektorii z interpolacją liniową i kołową wykorzystano ideę pozornej redundancji. Polega ona na zmniejszeniu liczby parametrów niezbędnych do opisu pozycji narzędzia. W ten sposób otrzymuje się konfigurację redundantną.

Abstract: The manipulation system with URP-6 robot on the track has been described. This system has been successfully implemented for bevelling in mining machine factory. For trajectory generation with linear and circular interpolation the concept of virtual redundancy was used. Main idea is to reduce number of parameters, which are necessary to define pose of the robot tool. Then a redundant configuration was obtained.

1. WSTĘP

Profile z grubych blach stosowane są powszechnie w przemyśle budowy maszyn. Wykonuje się z nich obudowy, korpusy lub elementy nośne konstrukcji. Do łączenia profili wykorzystuje się najczęściej spawanie. O jakości tych połączeń w dużej mierze decyduje odpowiednie przygotowanie elementów.

Przygotowanie elementów z blach grubych, które mają być przeznaczone do spawania, odbywa się z reguły w dwóch fazach. Pierwsza z nich to wycinanie zaprojektowanych profili. W drugiej fazie wykonuje się ukosowanie, czyli przygotowanie brzegów blach pod spoiny. Operację wycinania przeprowadza się najczęściej na specjalizowanych automatach tnących. Ukosowanie często jest jeszcze wykonywane przy dużym udziale pracy ręcznej. Niekiedy operacja ta jest zorganizowana w cyklu półautomatycznym. Wykorzystuje się w niej np. sekatory zaopatrzone w palniki acetylenowo-tlenowe. Takie rozwiązanie jest stosowane w TFUG TAGOR w Tarnowskich Górach. Pracownik prowadzi palnik tnący po specjalnej jezdni, w sposób ciągły nadzorując pracę urządzenia. Występują przy tym niekorzystne warunki bhp. Człowiek, przebywając w bezpośredniej bliskości operacji cięcia, wdycha szkodliwe pary i tlenki metali, jest narażony na hałas. Na stanowiskach tych zdarzają się wypadki poparzeń. Metoda ta ma również mankamenty technologiczne. Przejście z fazowania prostoliniowego do fazowania po łuku odbywa się z przerwą, co powoduje pogorszenie jakości powierzchni (ubytki i wżery). Ustawianie urządzenia do pracy, a szczególnie jego przezbieranie na nowy detal jest trudne i czasochłonne.

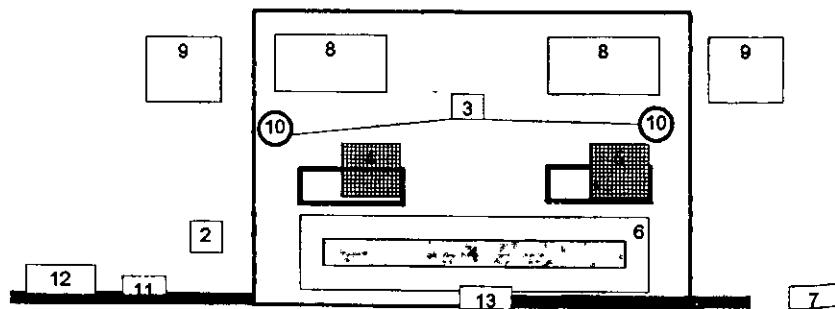
Tych wad nie mają stanowiska automatyczne, w których palnik jest najczęściej prowadzony przez robota przemysłowego. Takie rozwiązania oferuje kilka firm na świecie. Są one jednak

¹⁾ artykuł prezentuje wyniki prac realizowanych w ramach projektu celowego KBN

bardzo drogie, często niedostępne z tego powodu dla polskich odbiorców. Wzorując się na dostępnych przykładach zagranicznych oraz uwzględniając specyfikę technologii stosowanej w produkcji maszyn górniczych, przygotowano koncepcję takiego stanowiska zrobotyzowanego, bazującą na krajowych konstrukcjach i krajowej myśli technicznej. Prototypową instalację zrealizowano w zakładach TAGOR.

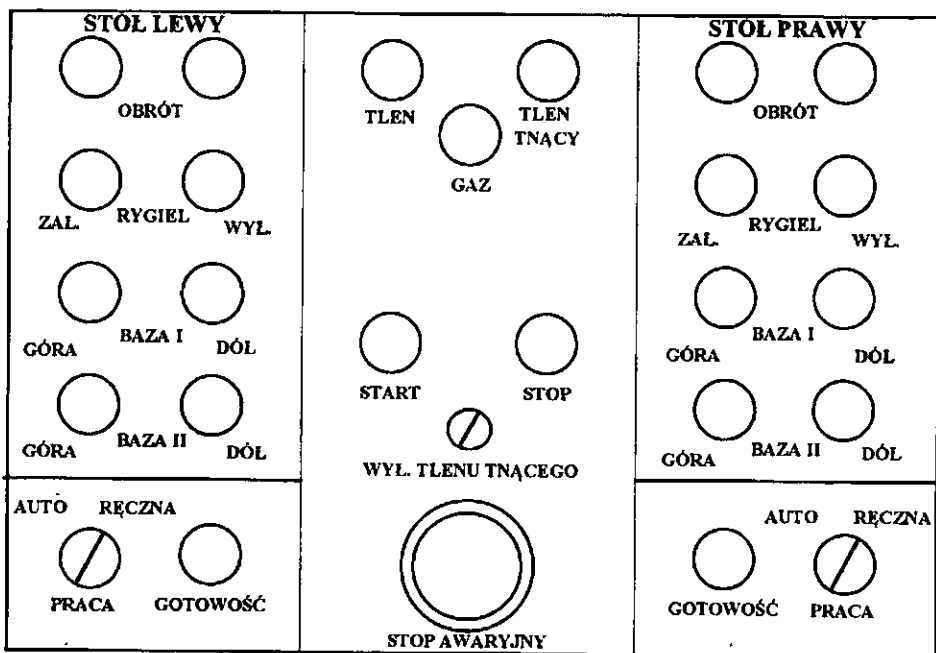
2. BUDOWA ZROBOTYZOWANEGO STANOWISKA UKOSOWANIA

Podstawowym elementem stanowiska jest robot przemysłowy URP-6. Posiada on manipulator pięcioosiowy o strukturze antropomorficznej. Robot jest zainstalowany na torze jezdnym (moduł translacyjny). Napęd wózka toru, sterowany w trybie CP, z szafy sterowniczej URP, stanowi pełnoprawny, dodatkowy stopień swobody systemu. Robot ma zamocowany, jako narzędzie, palnik acetylenowo-tlenowy typu MESSER-GRIESHEIM. Przewody gazowe są poprowadzone po ramieniu robota do zaworów odcinających, a dalej poprzez ruchome, podwieszane prowadnice do punktu rozgałęzienia zasilania na ścianie hali produkcyjnej. W systemie zastosowano zapalarkę elektryczną z wyłącznikiem krańcowym. Robot najjeżdżając palnikiem na wyłącznik uruchamia zapalarkę. Jako stanowiska robocze ukosowania są zainstalowane dwa obrotowe stoły pozycjonujące. Napęd stołów jest pneumatyczny. Jako sterownik nadrzędny systemu (gniazda) został zainstalowany nowoczesny sterownik logiczny C60K firmy OMRON. Jest on zamontowany w osobnej szafce. Górna ściana tej szafki stanowi pulpit operatora stanowiska ukosowania. W stanowisku zainstalowano dwa żurawiki transportowe do przenoszenia cięższych detali. Na słupach żurawików znajdują się gniazda zasilania ~220V, wykorzystywane do podłączenia szlifierek kątowych, którymi operator czyści pofazowane detale. Jako zabezpieczenie obszaru pracy robota w stanowisku zastosowano dwie kurtyny świetlne, po jednej dla każdego stołu. Zostały one zbudowane z elementów optycznych firmy OMRON. Nadajniki zamontowano na szafce sterownika gniazda, a odbiorniki na słupach żurawików. Ogólny schemat rozmieszczenia urządzeń w stanowisku oraz elementów na pulpicie operatora przedstawiono na rysunkach 1 i 2.



- | | |
|----------------------------------|--|
| 1 - robot URP-6 na torze jezdnym | 7 - słup energetyczny |
| 2 - szafa robota | 8 - magazyny wejściowe |
| 3 - mała szafka | 9 - pola odkładcze |
| 4 - stół prawy | 10 - żurawiki transportowe |
| 5 - stół lewy | 11 - zasilanie robota |
| 6 - kanał fundamentowy | 12 - rozdzielnia gazowa |
| | 13 - zasilanie zapalarki i szafki sterującej |

Rys. 1. Rozmieszczenie elementów systemu ukosowania blach



Rys. 2. Płyta czołowa pulpitu operatora.

3. DZIAŁANIE I FUNKCJE ZROBOTYZOWANEGO SYSTEMU UKOSOWANIA

Obsługa zrobotyzowanego stanowiska ukosowania jest jednoosobowa. Przed rozpoczęciem pracy operator musi stanowisko przygotować, a w tym celu należy wykonać następujące czynności:

- włączenie zasilania elektrycznego stanowiska,
- włączenie zasilania robota,
- synchronizacja robota,
- sprawdzenie zachowania programu użytkowego - ew. wgranie nowego programu,
- włączenie zasilania zapalarki i szafki sterowniczej,
- włączenie zasilania pneumatycznego i gazów technicznych.

W dalszej pracy operator nie korzysta już z panelu programowania robota. Potrzebne mu są tylko dwie funkcje robota: START PROGRAMU, STOP PROGRAMU i przyciski odpowiedzialne za uaktywnienie obu tych funkcji są zainstalowane na pulpicie operatora. Obsługa stanowiska pracującego w cyklu produkcyjnym przebiega według następującego porządku:

- Zdjęcie detali pofazowanych na stole lewym.
- Założenie nowych detali na stół lewy.
- Przełączenie stołu lewego w stan - PRACA AUTO.

- d) Zasygnalizowanie robotowi gotowości stołu lewego do fazowania - przycisk GOTOWOŚĆ stołu lewego na pulpicie operatora.
- e) Po zakończeniu fazowania na stole prawym robot rozpoczyna fazowanie na stole lewym.
- f) Zdjęcie detali pofazowanych na stole prawym.
- g) Założenie nowego detalu na stół prawy.
- h) Przelączenie stołu prawego w stan - PRACA AUTO.
- i) Zasygnalizowanie robotowi gotowości stołu prawego do fazowania - przycisk GOTOWOŚĆ stołu prawego na pulpicie operatora.
- j) Po zakończeniu fazowania na stole lewym robot rozpoczyna fazowanie na stole prawym.
- k) Powrót do punktu a).

Fazowanie detali trwa z reguły dużo dłużej niż ich zakładanie na stół. Dlatego po założeniu nowych detali operator może szlifować detale pofazowane wcześniej. Daje to dodatkowy wzrost wydajności stanowiska.

W systemie wdrożono wiele funkcji i mechanizmów, opracowanych specjalnie pod kątem zastosowania do zrobotyzowanego ukosowania. Wprowadzono możliwość edycji parametrów numerycznych trajektorii kołowej. Operator może odczytać i zmienić wartość współrzędnych opisujących okrąg, po którym ma być wykonywane fazowanie. Opracowano mechanizm kończenia przerwanej fazy. W warunkach przemysłowych zdarzają się sytuacje niespodziewanego zgaśnięcia palnika - przerwy dopływu gaz, zanieczyszczenie dyszy. Operator może rozpocząć wykonywanie programu od razu od instrukcji ruchu, w której faza nie została dokończona, bez włączania tlenu tnącego. Do szafy robota jest dołączony specjalny, dodatkowy panel umożliwiający zatrzymanie robota w miejscu przerwania fazy, podgrzanie metalu i po włączeniu tlenu tnącego kontynuowanie fazowania. Przy pewnej wprawie operatora miejsca takie są praktycznie niezauważalne na powierzchni detalu. Z tą funkcją związane jest wprowadzenie możliwości fazowania w trybie "PRACA RĘCZNA", gdy nie jest aktywna kurtyna świetlna danego stołu. Oczywiście możliwość tę należy traktować jako awaryjną, wykorzystywaną właśnie przy kończeniu przerwanej spoiny, gdy operator musi dokładnie obserwować tor ruchu palnika. Z uwagi na różnorodność fazowanych detali, zastosowano uchwyt palnika umożliwiający jego przestawienie, dostosowanie do aktualnie wykonywanego programu fazowania. Wiąże się to jednak z niebezpieczeństwem przypadkowego przesunięcia palnika w uchwycie. Aby się zabezpieczyć przed skutkami takich sytuacji, na stanowisku produkcyjnym zamontowano stały, przymocowany do ściany, punkt wzorcowy. Operator do każdego programu użytkowego dogrywa fragment najazdu palnika na punkt wzorcowy - w ten sposób kontroluje poprawność ustawienia narzędzia. Sprawdzenie takie dokonywane jest raz, na początku zmiany i ewentualnie w razie wystąpienia zmian trajektorii fazowania.

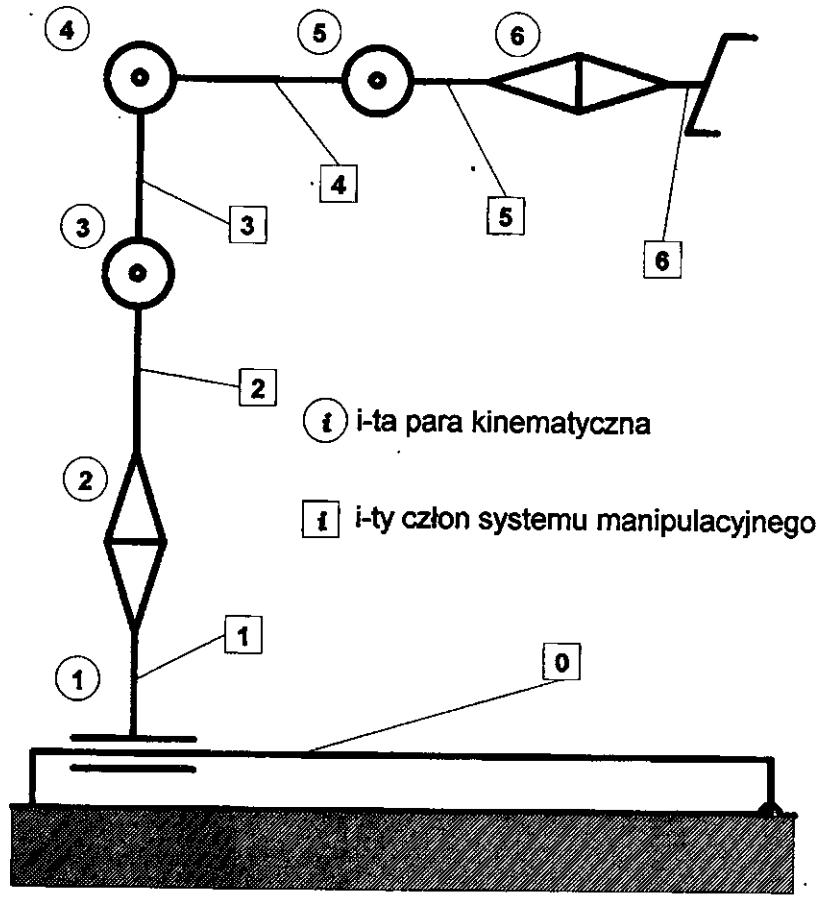
4. KINEMATYKA SYSTEMU MANIPULACYJNEGO, GENERATOR TRAJEKTORII LINIOWEJ I KOŁOWEJ

Przedstawiany system manipulacyjny złożony z robota URP-6 na torze jezdnym posiada sześć osi, stanowi więc pełną strukturę kinematyczną - schemat kinematyczny przedstawia rysunek

3. Stosując notację Denavita-Hartenberga można zapisać pozycję narzędzia systemu jako macierz:

$$T_POS = \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & p_x \\ n_y & o_y & a_y & p_y \\ n_z & o_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R & P \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

gdzie R - część macierzy T_POS odpowiedzialna za orientację narzędzia (jako parametry definiujące orientację wykorzystane są trzy kąty Eulera nutacja, precesja i obrót) i P - część macierzy odpowiedzialna za położenie punktu roboczego TCP narzędzia (jako parametry definiujące położenie wykorzystane są trzy współrzędne kartezjańskie x, y, z).



Rys. 3. Schemat kinematyczny robota URP-6 na torze jezdny.

Pozycja narzędzia wynika z aktualnej konfiguracji systemu manipulacyjnego oraz ze sposobu zamontowania narzędzia, a więc macierz pozycji T_POS jest iloczynem:

$$T_POS = T * T_TOOL \quad (2)$$

gdzie T - jest macierzą przejścia z układu bazowego, związanego z nieruchomą podstawą toru jezdneho do układu kołnierza (związany z ostatnim członem systemu manipulacyjnego), a T_TOOL - jest macierzą opisującą narzędzie, czyli palnik, w układzie współrzędnych związanym z kołnierzem.

Generator trajektorii w przestrzeni kartezjańskiej można zapisać w ogólności jako:

$$T_POS = T_PI * DF(r) \quad (3)$$

gdzie T_PI jest macierzą pozycji startowej, a $DF(r)$ - macierzową funkcją generatora trajektorii interpolowanej (Drive Function). Parametr r określa chwilę czasową, dla której pozycja T_POS ma być określona. Przy takim podejściu i pełnym opisie narzędzia generator trajektorii liniowej i kołowej można zalgorytmizować. Otrzymamy w ten sposób formuły analityczne definiujące funkcję $DF(r)$ dla obu typów interpolacji. W omawianej aplikacji przyjęto, zgodnie z wymaganiami technologicznymi następujące wymagania na trajektorie:

- interpolacja liniowa - punkt roboczy narzędzia TCP(x, y, z) porusza się po linii prostej w przestrzeni, orientacja narzędzia (nutacja, precesja, obrót) zmienia się w sposób jednostajny od pozycji startowej do końcowej,
- interpolacja kołowa - punkt roboczy narzędzia TCP(x, y, z) porusza się po okręgu w przestrzeni, orientacja narzędzia (nutacja, precesja, obrót) zmienia się w sposób jednostajny od pozycji startowej do końcowej, zachowane jest przy tym stałe nachylenie palnika względem płaszczyzny okręgu oraz względem toru ruchu.

Po opracowaniu i zaimplementowaniu generatora trajektorii prostoliniowej i kołowej, zgodnie z powyższym podejściem, przeprowadzono próby laboratoryjne. Okazało się, że system cechuje ograniczona manipulowalność narzędziem, co prowadzi do ograniczenia efektywnej przestrzeni roboczej dla trajektorii kołowych oraz liniowych. Po dokładniejszej analizie struktury kinematycznej systemu, taki wynik prób wydaje się uzasadniony. Zwróćmy bowiem uwagę, że w systemie tym trzy stopnie swobody, nie wpływające na orientację narzędzia, a więc zmieniające tylko jego położenie, a mianowicie ruch translacyjny wózka, ós druga i trzecia robota, nie mogą przemieszczać narzędzia w całej przestrzeni roboczej. Nie mogą mianowicie wymusić ruchu w kierunku poprzecznym do toru jezdneho. Do tego potrzeba zaangażować pierwszą oś robota, a jej ruch wpływa na orientację narzędzia.

W tej sytuacji przygotowano i sprawdzono koncepcję, nazwaną przez autorów redundancją pozorną [11]. Polega ona na ograniczeniu liczby kontrolowanych współrzędnych opisujących narzędzie. W tym konkretnym przypadku zdecydowano zrezygnować z kontroli obrotu narzędzia wokół własnej osi. Jest to o tyle uzasadnione, że wykorzystywane narzędzie, palnik gazowy, jest osiowo-symetryczne. Tak więc kątem tego narzędzia wokół jego własnej osi nie ma znaczenia z punktu widzenia technologii. Oczywiście w wyniku takiego podejścia otrzymaliśmy strukturę nadmiarową, redundantną: mamy sześć współrzędnych wewnętrznych i pięć kontrolowanych współrzędnych zewnętrznych. Przy implementacji tej koncepcji nie zmieniono opisu narzędzia i jego pozycji w przestrzeni. Zmiany wprowadzono natomiast w generatorze trajektorii. Jest on teraz dwuprzebiegowy. W pierwszym kroku obliczana jest nowa pozycja pośrednia w zakresie pięciu współrzędnych (x, y, z, nutacja, precesja). W drugim kroku obliczany jest parametr obrót, jako wynikający z konfiguracji zapewniającej realizację wcześniej ustalonych pięciu współrzędnych. Wykorzystano tutaj metody znane z prac dotyczących planowania trajektorii ruchu robotów redundantnych. System, po

wprowadzeniu opisanych metod, został uruchomiony i przetestowany w laboratorium. Próby zakończyły się wynikiem pozytywnym.

8. INSTALACJA, PRÓBY EKSPLOATACYJNE I PRACA W CYKLU PRODUKCYJNYM

Na etapie instalacji systemu trzeba było rozwiązać wiele dodatkowych problemów technicznych. Najważniejsza była kalibracja geometryczna systemu. Już podczas prób laboratoryjnych okazało się, że na dokładność odtwarzania trajektorii interpolowanych bardzo duży wpływ mają:

- poziomowanie toru jezdnego i stołów pozycjonujących - chodzi o to, aby płaszczyzna pozioma bazowego układu współrzędnych, przyjmowana przez system sterowania do obliczeń związanych z generowaniem trajektorii narzędzia, była równoległa do płaszczyzn roboczych stołów pozycjonujących,
- kalibracja manipulatora URP-6 - system przyjmuje pewną konfigurację, zwaną konfiguracją synchronizacji geometrycznej, jako pozycję odniesienia, względem niej określa kierunki bazowego układu współrzędnych; kalibracja manipulatora polega na takim ustawieniu pozycji synchronizacji hardware'owej, aby w konfiguracji synchronizacji geometrycznej układ bazowy był zgodny z przyjętym w programie,
- kalibracja osi pierwszej manipulatora URP-6 względem osi toru jezdnego - tor i manipulator URP-6 są kalibrowane osobno; pionowe ustawienie manipulatora gwarantuje konstrukcja wózka; zgodność kierunku zerowego pierwszej osi manipulatora z osią toru jezdnego zapewnia system mocowania, okazało się jednak, że nawet minimalne przesunięcia manipulatora na śrubach mocujących dają duże błędy podczas odtwarzania trajektorii - dlatego też w tym zakresie przeprowadzono osobne pomiary na stanowisku produkcyjnym, po zamontowaniu całego systemu i wprowadzono odpowiednią korektę kalibracyjną do oprogramowania sterującego.

Dodatkowo podczas prac z systemem powstało wiele problemów czysto technicznych. Niektóre rozwiązano już po próbach laboratoryjnych, inne dopiero na etapie instalacji i prób eksploatacyjnych. Obok wspomnianych już spraw związanych z kończeniem przerwanej fazy i kurtyną świetlną, trzeba wymienić także następujące problemy:

- trudne warunki środowiskowe skłoniły do zastosowania osłon toru jezdnego - dzięki temu nie ma żadnych problemów z zanieczyszczeniami elementów napędowych,
- zastosowano prowadnik kabla robota z tworzywa sztucznego - jest on lżejszy i ma bardzo małe opory ruchu,
- po wielu próbach rozwiązano problem zapalarki - samo automatyczne uruchamianie zapalarki okazało się mniejszym problemem niż zapewnienie odpowiedniej jej osłony - bez osłony podmuch gazu gasił własny płomień,
- ponieważ efektywna długość przejazdu toru wynosi ponad 4 metry, trzeba było rozwiązać problem prowadzenia przewodów gazowych w stanowisku produkcyjnym - opracowano własną konstrukcję wahliwego wieszaka poruszającego się na rolkach po szynie zamocowanej nad torem,

9. PODSUMOWANIE

Opisane stanowisko zostało wdrożone do eksploatacji w drugiej połowie 1996 roku. Cały czwarty kwartał przepracowało już w cyklu produkcyjnym. Po tym okresie można ocenić uzyskane efekty realizacji pracy. Można je podzielić na trzy grupy:

- a) Wydajność - w zależności od rodzaju detalu uzyskano wzrost wydajności od 200 do 300% przy szczególnie skomplikowanych detalach. Wynika to głównie z tego, że w stanowiskach pracy ręcznej operator tracił dużo czasu na przezbrajanie sekatora, po wykonaniu faz musiał detale oczyścić/oszlifować (w tym czasie oczywiście nie fazował) - w stanowisku zrobotyzowanym tych problemów nie ma.
- b) Jakość - uzyskano znaczną poprawę jakości wykonywanych faz - głównie na łukach. Wprowadzone funkcje interpolacji pozwoliły uzyskać stałą szerokość fazy zarówno na odcinkach prostych jak i krzywoliniowych. Równie ważna jest stabilizacja jakości - elementy wyprodukowane na stanowisku zrobotyzowanym są praktycznie identyczne.
- c) Warunki pracy - operator stanowiska zrobotyzowanego pracuje w znacznie wygodniejszej pozycji niż na stanowiskach pracy ręcznej. Dzięki oddaleniu operatora od samego procesu cięcia termicznego metalu znacznie ograniczono zagrożenia poparzeń oraz wynikające z wdychania oparów i tlenków metali.

.Podczas realizacji tego wdrożenia zebrano wiele uwag i praktycznych doświadczeń, zarówno w zakresie technologii zrobotyzowanego fazowania, jak też w zakresie sterowania i planowania trajektorii złożonych systemów manipulacyjnych. Doświadczenia te mogą być przydatne przy podejmowaniu innych prac z obszaru robotyzacji cięcia, ukosowania i spawania. Istnieje też możliwość powielania opisanego rozwiązania, również w nieco zmienionej konfiguracji kinematycznej.

LITERATURA

- [1] Appendino D.: Robotic cutting: trucks chassis customed-taylorred by a laser cutting cell. 27th ISIR Mediolan 1996
- [2] Brady M.: Robot Motion: Planning and Control. MIT Press, 1984r.
- [3] Canny J. F.: The Complexity of Robot Motion Planning, MIT Press, Cambridge, Mass., 1988r.
- [4] Jacórzynska M., Lichodziejewski C., Pilat Z.: Inverse Kinematics Methods for Redundant Manipulators and their Simulation and Verification. Conference on Robotics in Theory and Practice ROBTEP'95, 27-28 September 1995, Presov, Slovakia.
- [5] Jacórzynska M., Lichodziejewski C., Pilat Z.: Optimisation Methods in Inverse Kinematics Solution for Redundant Manipulators. International Symposium on Industrial Robots ISIR'96, Milano, Italy, 1996.
- [6] Kroth E., Reiss W.: Robot installation for fully automated processing of shipbuilding profiles using plasma cutting technology. 26th ISIR Singapur 1995
- [7] Latombe J.-C.: Robot Motion Planning. Kluwer Academic Publishers, 1991r.
- [8] Pachuta M.: Budowa układów sterowania napędów robotów. Stan obecny i kierunki rozwoju. Biuletyn PIAP, Warszawa 1992
- [9] Paul R. P.: Robot Manipulators: Mathematics, Programming and Control, MIT Press, Cambridge, Mass., 1981r.
- [10] Pilat Z., Lichodziejewski C.: Virtual Redundancy and Its Realisation in Robotised Beveling. International Symposium on Robotics ISR'97, Detroit, USA, 1997 (referat przyjęty na konferencję).
- [11] Syrczyński A., Jabłoński P. Układ sterowania robotów URP. Biuletyn PIAP Nr 1-165/93, Warszawa 1993.